

Chimie et sport olympique et paralympique

Jérôme Allanic
Rafik Amrane
Michel Audran
Philippe Brasseur
Marie-Ange Bueno
Christophe Clanet
Virginie Couharde Louvel
Audrey Duval
Alexis Lahutte
Irène Margaritis
Jun Mougner
Yves Rémond
Adrien Sedeaud

*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Paris 2024

Chimie et sport olympique et paralympique

Paris 2024

Mercredi
7 Février 2024

Chimie
et
Sports
en
cette **année**
et **Olympique**
Paralympique

Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et sports en cette année olympique et paralympique »
qui s'est déroulé le 7 février 2024 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Philippe Gœbel

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et sport olympique et paralympique Paris 2024

Jérôme Allanic, Rafik Amrane, Michel Audran, Philippe Brasseur,
Marie-Ange Bueno, Christophe Clanet, Virginie Couharde Louvel,
Audrey Duval, Alexis Lahutte, Irène Margaritis, Jun Mougner,
Yves Rémond, Adrien Sedeaud

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Crédits couverture :
Images Adobe Stock : © peopleimages.com – © skampixelle –
© Алексей Коза – © Danijela – © MarekPhotoDesign.com /
Adobe Stock – © Arkema – © Paris 2024
Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-3629-1
ISBN (ebook) : 978-2-7598-3630-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2025 – Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Jérôme Allanic

*Directeur Marché Mondial
Sport, Arkema*

Rafik Amrane

*Directeur Industriel de Sanofi
Consumer Healthcare*

Michel Audran

*Professeur émérite Université
de Montpellier, Laboratoire
de Biophysique, UFR de
Pharmacie, Université
Montpellier I*

Philippe Brasseur

*Senior Customer Technical
Development, Syensqo*

Marie-Ange Bueno

*Professeure à l'ENSISA
(École Nationale Supérieure
d'Ingénieurs Sud Alsace) et
au Laboratoire de Physique et
Mécanique Textiles, Université
de Haute-Alsace Mulhouse*

Christophe Clanet

*Professeur à l'École
Polytechnique et à l'ESPCI,
Directeur du Programme
Science 2024®*

Virginie Couharde Louvel

*Key Account and Business
Development Manager,
Syensqo*

Audrey Duval

Présidente de Sanofi France

Alexis Lahutte

*Directeur Industriel Matières
Premières, Decathlon*

Irène Margaritis

*Professeur des Universités,
Adjointe au Directeur
d'évaluation des risques, Anses*

Jun Mougner

*Responsable Business
Développement Mondial Sport,
Arkema*

Yves Rémond

*Professeur émérite à
l'Université de Strasbourg,
École de Chimie (ECPM)*

Adrien Sedeaud

*Chercheur et Adjoint du
Directeur de l'IRMES, Pôle
Performance / IRMES
Institut National du Sport,
de l'Expertise et de la
Performance (INSEP)*

Équipe éditoriale :

*Danièle Olivier
et Paul Rigny*

Sommaire

Avant-propos, par Paul Rigny	9
Préface, par Danièle Olivier	13

Partie 1 : La science au service des performances sportives

Chapitre 1 : Science 2024 [®] : quand scientifiques et sportifs s'associent pour repousser les limites d'après la conférence de Christophe Clanet	19
---	----

Chapitre 2 : Comment mettre les données au service du sport de haut niveau d'après la conférence d'Adrien Sedeaud	37
---	----

Chapitre 3 : Le rôle des matériaux composites dans les performances sportives par Yves Rémond	51
---	----

Chapitre 4 : Quel doit être le rôle d'un vêtement de sport ? par Marie-Ange Bueno	71
---	----

Partie 2 : Les molécules de la performance

Chapitre 5 : Matériaux de haute performance au service du (handi-)sport d'après la conférence de Virginie Couharde Louvel et Philippe Brasseur	87
--	----

Chapitre 6 : Arkema et ses biomatériaux au service des athlètes d'après la conférence de Jérôme Allanic et Jun Mougner	97
--	----

Partie 3 : Santé et sport

Chapitre 7 : Détection du dopage : challenges et perspectives
par **Michel Audran**..... 107

Chapitre 8 : Sport et nutrition : les suppléments, utiles ou pratiques à risque ?
par **Irène Margaritis** 119

Partie 4 : Sport et industrie : des valeurs communes

Chapitre 9 : Des valeurs communes autour de la recherche, de l'industrie et du sport : l'exemple de Sanofi
d'après **les conférences d'Audrey Duval et Rafik Amrane**..... 137

Chapitre 10 : Les matériaux au service de la performance de la chaussure
par **Alexis Lahutte**..... 145

Avant- propos

L'activité physique est indissociable de la nature des hommes et des femmes, de leur naissance à leur mort. On veut bouger, on veut marcher. Puis on veut plus : on veut courir, nager, grimper aux arbres. C'est la base de l'individu, c'est sa joie et ce sont ses capacités. C'est le «**sport phase 1**». Puis vient une autre dimension : c'est **LE MIEUX** – et c'est là que le «sport» commence vraiment. «Mieux», c'est aller plus loin, plus longtemps, grimper plus haut, plus vite. C'est le «**sport phase 2**». Le «mieux», c'est déjà un germe de compétition qui annonce l'évolution historique du sport.

Mais l'individu regarde autour de lui, il voit qu'il existe des arbres plus élevés, des pentes plus fortes, etc. Il attrape le sens de la performance et il n'en a pas fini, car son évolution est sans fin. C'est bientôt un véritable basculement : il regarde **LES PERFORMANCES**, il «se compare» aux autres ; son activité n'est pas seulement là «pour lui faire plaisir» gratuitement, elle lui confère une place parmi ses semblables, une place dans la société. C'est le «**sport phase 3**», ou «**sport compétition**».

C'est bien à ce niveau-là qu'advient **les Jeux Olympiques** – merveilleuse invention qui fait entrer en phase «sport de compétition» potentiellement tous les citoyens. Les **Jeux Olympiques et Paralympiques** en sont l'expression ultime – phénomène collectif, national, mondial... **phénomène extraordinaire!**

La joie de l'exercice est toujours là, bien sûr, mais l'esprit des épreuves sportives s'est modifié avec une dimension sociale complexe, qui se construit sur des ambitions et risques des échecs. Depuis cette «phase 3», qui remonte évidemment à l'Antiquité, le sport est devenu un phénomène social «majeur» des sociétés, qui progressivement concerne tout le monde. Parti de l'élitisme masculin, il s'est **étendu au sport féminin**, puis plus récemment **au «handisport»**.

Activité purement physique d'abord, quand il s'est tourné vers la performance, le sport a mobilisé d'autres intelligences que celles des sportifs. Cela a commencé par celles des observateurs qui veulent comprendre la diversité des performances et les

optimiser. Et puis, on connaît la logique de l'esprit humain : ce magnifique champ d'observation que constitue le sport devient, avec le temps, « activité scientifique » basée sur l'observation de **l'individu : seul en phase 1 d'abord** – ses réactions mentales, ses réactions physiques –, en interactions en **collectivité ensuite, en phase 2**, avec l'apparition d'artefacts (le javelot, le char) qui donnent naissance à de nouvelles épreuves. Le sportif « presque nu » de l'Antiquité s'est habillé, s'est adjoint des chaussures, des protections contre le froid ou le chaud, etc. Il a inventé de nouvelles épreuves en perfectionnant l'utilisation des outils.

C'est ainsi qu'ont été sollicitées d'abord la **compréhension du corps** qui permet de sélectionner ou de façonner les porteurs de bonnes performances, puis **celle du tempérament** pour privilégier le « moral efficace » du sportif : saura-t-il recommencer et s'obstiner, s'adapter à de nouvelles conditions ? Saura-t-il se confronter aux épreuves et traverser les difficultés ? Ces préoccupations, de plus en plus populaires, sollicitent la médecine, la psychologie – de façon générale, les **sciences de la santé**.

La **pratique du dopage** mérite une mention particulière : observer l'effet du régime de vie sur les performances est bien naturel, adapter son régime pour être meilleur ne l'est pas moins. Mais – particularité – on se heurte à la position éthique de la société : n'est-ce pas « tricher » que de s'échapper des règles « naturelles » ? Le xx^e puis le xx^e siècle

ont fixé des limites que la technique trouve difficiles à suivre – nouveaux moyens dopants, nouveaux moyens de les détecter... Une véritable « course aux armements » s'est installée qui reste vivante et délicate.

Avec le « sport phase 3 » – **le sport compétition** – et l'explosion des artefacts, de nouveaux professionnels se sont mobilisés sur le sport. L'utilisation d'un matériel posait immédiatement le perfectionnement de sa conception puis de sa fabrication. Depuis le javelot d'Achille ou le glaive d'Hector, le problème était présent. Tout de suite, ce sont les techniciens et les artisans qui ont apporté leurs propositions, leurs inventions, leurs réussites. Aujourd'hui, on pourrait dire que ce sont les industriels, leurs ateliers et leurs laboratoires qui sont à la manœuvre. Leurs succès sont souvent stupéfiants ; le domaine des nouveaux matériaux en donne des exemples magnifiques. **Les possibilités des « matériaux composites »**, naguère inconnus, donnent lieu à des propriétés presque miraculeuses. L'activité sportive souvent en est à l'origine, mais de nombreuses activités industrielles – bientôt toutes – en tireront profit.

Le sport, belle histoire de l'aventure humaine. Aventure individuelle, puis aventure collective. Sa proximité avec la science, la technique et l'industrie est un phénomène dominant – qu'on l'approuve ou qu'on le juge excessif. Toutes ses étapes sont marquées par le progrès, l'amélioration de la condition humaine – que ce soit son

moral, son confort ou surtout le bénéfice de l'effort. Et de Jeux Olympiques en Jeux Olympiques, on en voit la progression et, à l'évidence... ce n'est pas fini !

Liste des ouvrages de la collection «Chimie et...», publiés par la Fondation de la Maison de la Chimie à la suite des colloques «Chimie et...» :

La Chimie et la mer ; Chimie et santé ; Chimie et art ; Chimie et alimentation ; Chimie et sport ; Chimie et habitat ; Chimie et Nature ; Chimie et enjeux énergétiques ; Chimie et transports... vers des transports décarbonés ; Chimie et technologies de l'information ; Chimie et expertise... sécurité des biens et des personnes ; Chimie et cerveau ;

Chimie et expertise... santé et environnement ; Chimie et changement climatique ; Chimie, dermo-cosmétique et beauté ; La Chimie et les grandes villes ; La Chimie et les sens ; Chimie, aéronautique et espace ; Chimie et biologie de synthèse ; Chimie, nanomatériaux, nanotechnologies ; Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité ; Chimie et nouvelles thérapies ; Chimie et lumière ; Chimie et énergies nouvelles ; Chimie et agriculture durable ; Chimie et Notre-Dame de Paris ; Chimie et matériaux stratégiques ; Chimie, recyclage et économie circulaire.

Paul Rigny

Conseiller scientifique auprès du président de la Fondation de la Maison de la Chimie

Préface

Par manque d'informations ou de connaissances, la chimie est trop souvent rendue responsable de bien des maux. C'est le cas notamment dans les domaines de l'environnement, du développement durable ou du changement climatique, pour ne citer que les plus médiatiques. Cela alors même que cette discipline, seule ou associée à d'autres disciplines scientifiques, est indispensable à la résolution des problèmes concernés, et plus largement à la qualité de notre vie quotidienne.

Dans le cadre de notre mission de formation des jeunes et d'information des citoyens, nos colloques de la série « Chimie et... », dont celui-ci est le trentième, ont pour objectif de rétablir la réalité scientifique et de montrer la diversité des apports positifs des Sciences, dont celles de la Chimie, à la société et dans tous les domaines.

Nous avons déjà fait un colloque et un ouvrage « Chimie et sport » en 2010. Mais, en quatorze ans, beaucoup de choses ont évolué et, en cette année olympique et paralympique 2024, nous avons ciblé le sport de haut niveau, les performances, la chimie de

notre corps, et la chimie des matériaux pour le sport.

Nous avons voulu aussi vous présenter l'opinion de ceux qui sont directement concernés : les athlètes olympiques et paralympiques, sur les apports de la recherche dans le sport de haut niveau.

La première partie montre comment les scientifiques peuvent aider à améliorer les performances des athlètes de haut niveau.

Christophe Clanet est le Directeur du Programme Sciences 2024 qui a regroupé 60 chercheurs depuis 2018, lesquels se sont associés aux sportifs des équipes de France en vue des Jeux Olympiques, pour comprendre et donc mieux maîtriser les paramètres physiques qui influent sur leurs performances. À partir d'exemples tirés de la natation et du cyclisme, il a expliqué comment on peut utiliser ces données scientifiques pour améliorer les performances des athlètes français et les stratégies de course pour faire gagner la France aux JO 2024.

Dans le même domaine, le deuxième chapitre est un

résumé de la conférence d'Adrien Sedeaud qui a présenté quelques points importants de son dernier ouvrage, *Gagner avec les données*, paru en juin 2024. Adrien Sedeaud est un scientifique du sport, spécialiste de l'épidémiologie de la performance, de la détection et de l'estimation des potentiels, qui travaille en relation étroite avec les athlètes et leurs entraîneurs. Il a choisi quelques exemples pour montrer l'apport des données, *via* les capteurs et le développement des méthodes d'analyses, sur l'estimation des potentiels, le monitoring, l'estimation du risque et des blessures ou l'analyse de la concurrence.

Les deux chapitres suivants montrent plus spécifiquement ce que la recherche en chimie peut apporter à la performance. **Sélectionner le bon équipement** est d'une importance primordiale pour accompagner les athlètes dans leur recherche d'excellence tout en garantissant leur sécurité, leur permettant ainsi de libérer tout leur potentiel. Les matériaux à base de polymères représentent souvent un choix gagnant, car ils confèrent des caractéristiques particulières telles que la légèreté et la résistance mécanique.

Le Professeur **Yves Remond** explique à partir d'exemples comment les **matériaux composites peuvent répondre avec efficacité aux challenges proposés par de nombreux sports et handisports**.

C'est une spécialiste des matériaux textiles, la Professeure **Marie-Ange Bueno**, qui présente comment les cahiers des charges des textiles sportifs

sont conçus et comment il faut choisir les polymères constitutifs, la morphologie des fibres, la structure des fils et leur assemblage. Les enjeux de la recherche sur le textile portent sur la porosité, la pilosité pour gérer les frottements, l'évacuation de l'humidité, la protection contre le froid.

La deuxième partie présente quelques exemples de molécules et matériaux conçus pour améliorer les performances dans le cadre d'une coopération étroite entre les fournisseurs de matière première, les fabricants de matériel et les sportifs de haut niveau.

C'est le cas du groupe Solvay qui soutient trois athlètes participant aux jeux paralympiques 2024, avec le chapitre sur les matériaux de haute performance au service du handisport, d'après les conférences de **Virginie Couharde Louvel** et de **Pierre Brasseur**.

De même, dans le domaine des matériaux chez Arkema, **MM. Allanic** et **Mougnier** montrent comment, depuis plus de quarante ans, les laboratoires de recherche sont au service des athlètes et de l'industrie sportive, pour mettre au point les matériaux spécifiques du sport de haut niveau : course à pied, foot, tennis, cyclisme, athlétisme, ski, golf, etc. Le cas des chaussures de sport est notamment présenté.

Dans le domaine de la santé, nous savons maintenant que la performance dépend de la chimie de notre corps : c'est le thème de la troisième partie.

Mais si la chimie de notre corps peut apporter le meilleur, elle peut aussi apporter le pire, et la traque aux molécules dopantes ou simplement nocives est un véritable défi dans lequel les chimistes jouent un rôle important.

Concernant la détection du dopage, **Michel Audran**, qui a été Directeur du département des Analyses de l'Agence Française de la Lutte contre le Dopage, fait le point sur le rôle joué par la chimie dans les challenges et les perspectives actuelles, notamment dans le cas des « *designer drugs* » dont les structures sont modifiées pour échapper à tout contrôle. Le chapitre issu de la conférence de **Mme Magaritis**, spécialiste de l'évaluation des risques de l'ANSES, développe le rôle central de l'alimentation courante dans la nutrition du sportif, mais alerte aussi sur les fragilités des allégations et même le caractère parfois trompeur des bénéfices attendus des compléments alimentaires qui, pour certains, peuvent même présenter des risques sanitaires.

La dernière partie de cet ouvrage montre que les industriels de la chimie non seulement se mettent au service du sport de haut niveau, mais aussi qu'ils partagent des valeurs communes.

C'est ce qu'explique **Mme Duval**, Présidente de Sanofi France, appuyée par le témoignage de **M. Rafik**

Amrane, ancien athlète des Jeux olympiques de Sydney qui est maintenant Directeur de la division Santé grand public de Sanofi. Il montre comment les leçons issues de sa carrière sportive se transposent dans sa carrière professionnelle.

Dans le même esprit, on découvre, avec **M. Lahutte**, comment un grand fournisseur d'équipements sportifs comme Decathlon innove dans ses laboratoires de recherche afin, d'une part, d'améliorer la performance de ses produits, notamment en ce qui concerne les matériaux utilisés pour les chaussures de sport et les textiles techniques, et, d'autre part, de mettre au point des solutions d'écoconception de ses produits.

À noter que les vidéos du colloque Chimie et sports olympiques et paralympiques, d'où sont issus les chapitres de cet ouvrage, sont accessibles et téléchargeables sur

<https://www.mediachimie.org/ressource/chimie-et-sports-en-cette-année-olympique-et-paralympique-colloque-février-2024>

Nous vous souhaitons une très bonne lecture.

Danièle Olivier
Vice-Présidente de
la Fondation internationale
de la Maison de la Chimie

Partie 1

La science au service
des performances sportives

Science 2024[®] : quand scientifiques et sportifs s'associent pour repousser les limites

D'après la conférence de Christophe Clanet, Professeur à l'École Polytechnique. Directeur du programme « Sciences 2024 » créé pour les Jeux Olympiques de Paris.

Introduction : **Sport et science** **sont indissociables**

Le sport, c'est fixer des objectifs physiques au corps et à l'esprit humains. Il ne s'agit de rien d'autre que la manifestation du besoin de curiosité et de dépassement propres à la nature humaine dont l'esprit de découverte est une caractéristique fondamentale.

Cette ambition impose d'observer le corps humain, son esprit, ses capacités d'adaptation, ses limites et la façon de les dépasser et d'assimiler les 100 façons d'aborder ou de se confronter avec l'environnement naturel. Cela conduit aussi à l'invention et à l'observation des « artefacts » (outils, équipements) et des réactions personnelles ou collectives qu'ils provoquent.

Essayons une synthèse : **observer mais surtout comprendre, pratiquer, et progresser. Tout cela est un appel à la science... n'est-ce pas évident ?** Les Jeux Olympiques concrétisent cette ambition de façon exemplaire.

1 Lien entre la science et le sport

1.1. Déjà aux origines : mesures et chiffres

Commençons nos observations par l'examen de la course à pied.

Pour examiner les courses de près, il est éclairant de tracer la **vitesse moyenne de la course**, c'est-à-dire la distance de la course divisée par le temps en fonction de la distance de course. La **Figure 2** fait apparaître deux régimes.

Dans la première partie, la vitesse moyenne augmente avec la distance de course : c'est le régime sprint (ici sur fond rouge). La deuxième partie où la vitesse moyenne diminue avec la distance de course définit nos courses de demi-fond et de fond (sur fond bleu).

Pour utiliser des courses pour honorer les dieux (**Encart «Origine des Jeux Olympiques»**), il faut des courses avec des vitesses moyennes élevées. Si jamais vous choisissez votre distance de course trop courte, Dieu ne va pas être content, et si elle est trop longue, cela ne va pas l'intéresser non plus.

Donc il faut sélectionner quelque chose plus proche de l'optimum et... c'est ce qui est fait par les Grecs ! La **Figure 3** représente le stade d'Olympie, qui a une longueur de 192 mètres. Cela correspond au maximum qui apparaît sur la **Figure 2**, ce qui nous indique que les Grecs avaient nos connaissances et « mesuraient ». La culture « mesure et chiffre » est adoptée aussi bien par les sportifs que par les scientifiques. Les sportifs mesurent... depuis toujours.

ORIGINE DES JEUX OLYMPIQUES

Nous sommes en 2024, mais n'oublions pas qu'il y a eu des Jeux régulièrement dans l'Antiquité, organisés en Grèce depuis l'année -776 jusqu'à l'année -393. Ils étaient organisés tous les quatre ans, ce qui fait qu'il y en a eu 292 éditions. Ils comportaient un grand nombre d'épreuves (**Figure 1**).



Figure 1

Les Jeux Olympiques antiques.

Les Jeux sont apparus pour des questions religieuses à Olympie parce que c'est l'endroit où Zeus a vaincu son père Chronos. On va les arrêter en 393 lorsqu'on va passer du polythéisme au monothéisme, religion officielle de l'Empire romain depuis l'empereur Constantin. Il n'y a plus de raison d'honorer les dieux puisqu'il n'y en a plus qu'un.

Il y a une autre remarque que l'on peut faire pour ces Jeux Olympiques anciens, c'est que les premières épreuves, des épreuves de courses, étaient à la fois pour les hommes et pour les femmes, qu'on appelait les Héraïa.

1.2. Enjeux de la collaboration entre scientifiques et sportifs à l'approche des JO

S'il y a des points communs entre les Jeux antiques et les Jeux modernes, il y a aussi des différences. Ainsi, il y a beaucoup plus d'épreuves aujourd'hui : 330. En conséquence, 330 médailles d'or seront décernées à Paris. Environ 10 000 athlètes vont concourir et 13 milliards de frais d'organisation sont engagés, ce qui revient à environ 1,3 million d'euros par athlète.

La **Figure 4** fait ressortir une intéressante typologie des épreuves sportives en montrant leur diversité. Il y a beaucoup de **sport à record** : 184 sur les 333. Il y a aussi des **sports de balle**, des **sports à jury** et des **sports de combat**. La plupart des exemples traités dans ce chapitre figurent dans la première catégorie, les sports à record.

Mais restons sur la question : qu'en est-il des relations entre la science et le sport ? Reformulons-la : « Est-ce que cela a du sens de coupler les scientifiques à des sportifs ? » Les sportifs se débrouillent bien depuis des années. Qu'est-ce que les scientifiques vont faire là-dedans ?

Le point de départ a été d'observer que les nations qui performaient actuellement aux Jeux Olympiques sont aussi celles qui font de la recherche.

La **Figure 5** présente le **podium des nations qui publient le plus**. Viennent en premier les États-Unis, puis la Chine et enfin la Grande-Bretagne, d'après un article paru dans

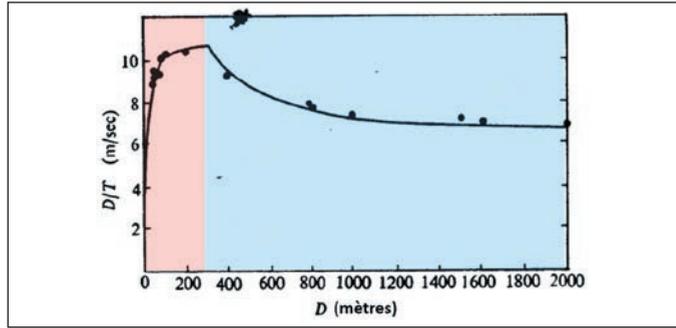


Figure 2

Courbe de l'évolution de la vitesse moyenne des coureurs en fonction de la distance totale de la course.



Figure 3

Photographie du stade d'Olympie.



Figure 4

Répartition des 333 sports olympiques modernes.

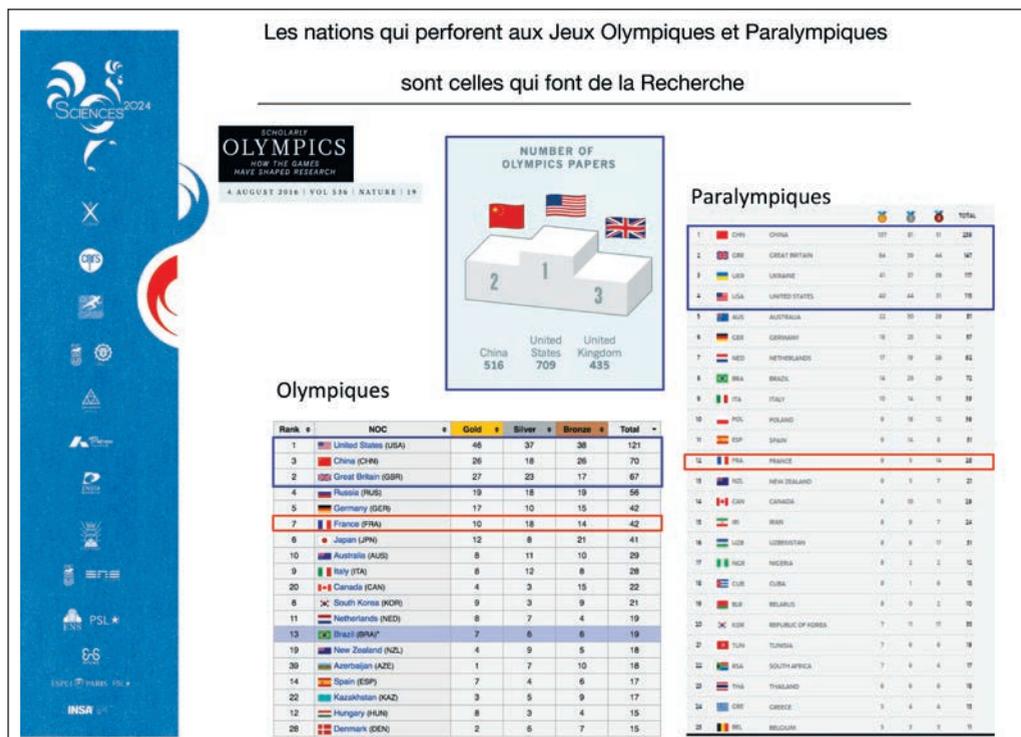


Figure 5

Mise en perspective des nations qui gagnent aux JO et celles qui font de la recherche une priorité.

Nature en 2016. Si on compare ce podium au **podium olympique**, c'est-à-dire celui du nombre de médailles, vous avez les États-Unis en premier, la Chine en deuxième, la Grande-Bretagne en troisième : **c'est le même podium** ! Pour la partie paralympique, c'est à peu près les mêmes, mais pas dans le même ordre : les Chinois sont en première place, les Anglais à la deuxième, les Ukrainiens viennent s'intercaler et les Américains sont quatrièmes.

Dans ces classements, où est la France ? Nous sommes septièmes en Olympiques et douzièmes en Paralympiques, c'est l'argument qui nous

a fait recevoir les Jeux à la maison. Mais nous avons l'impression que les sciences dures n'étaient pas investies auprès des sportifs de France, qu'il n'y avait pas d'enthousiasme pour se mettre à leur disposition. C'est ainsi que le **programme «Science 2024»** a été lancé. Il est piloté par l'École Polytechnique depuis sa création et regroupe 15 grandes écoles dans lesquelles une soixantaine de chercheurs se sont mobilisés. Cela a été le point de lancement de différentes études. Celles sur lesquelles nous allons le plus travailler sont celles qui sont financées par le programme d'État dédié.

2 Premier exemple d'étude : la science au service du tir à l'arc !

Le cadre de l'étude est la thèse de Tom Maddalena sur la **physique des sports de tir** (pour lui, il s'agissait du tir à la carabine). Les compétences de l'équipe en tir sont résumées sur la **Figure 6** : 22 Long Rifle (c'est une épreuve qui se fait à 50 mètres), tir au pistolet laser pour le pentathlon moderne puis tir à l'arc avec Florian Billoue. Ces études ont été coencadrées par Caroline Cohen.

La rencontre se fait à l'extérieur pour le tir à l'arc, la cible est à 70 mètres, le disque de la cible mesure 12 centimètres. En général, les Coréens sont en finale, car il y a une très grande école d'archers en Corée. Jean-Charles Valladont est notre champion. Dans la phase de qualification, pour savoir qui affronte qui, 72 flèches sont tirées. Donc le score maximal est de 720, et le premier va affronter le dernier, le deuxième l'avant-dernier, etc.

La **Figure 7** a été prise pendant la finale de 2016. Quelques chiffres : la distance, c'est 70 mètres, la vitesse caractéristique U_0 en sortie de la flèche est de 60 mètres par seconde, la flèche pèse 20 grammes et elle mesure 70 centimètres. Les durées de vol sont entre 1 et 1,2 seconde en l'air. La précision angulaire à respecter est de 0,1 degré.

La question posée est : comment optimiser la force de l'arc pour un archer qui vous a été indiqué par la Fédération Française ? Dans le cas de l'étude, c'était Florian Billoue.



Figure 6

Intervenants dans la thèse de Tom Maddalena sur le tir sportif.

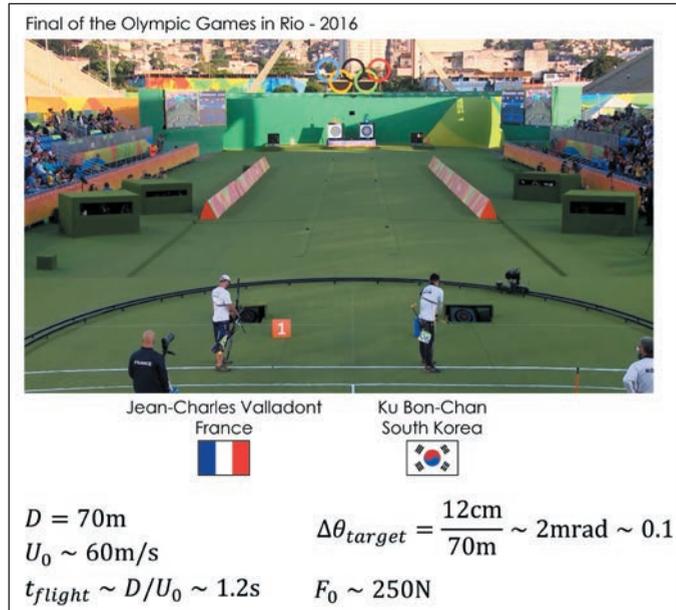


Figure 7

Finale de tir à l'arc aux JO de 2016 à Rio : les données.

Il faut alors l'équiper d'un dispositif qui permet de regarder et de suivre toutes les étapes de son processus de visée pour

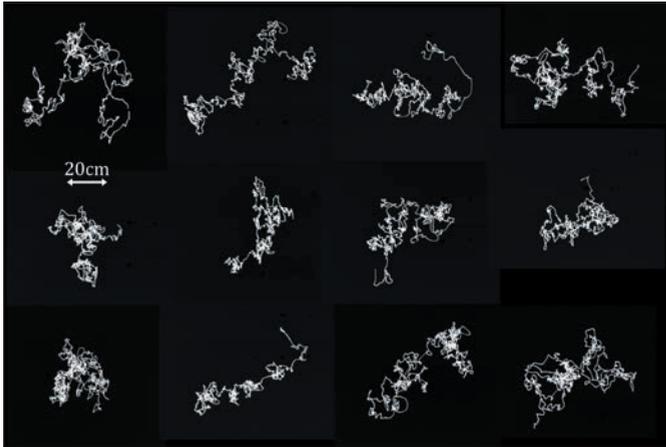


Figure 8

Représentation de la direction que pointe le carreau de la flèche.

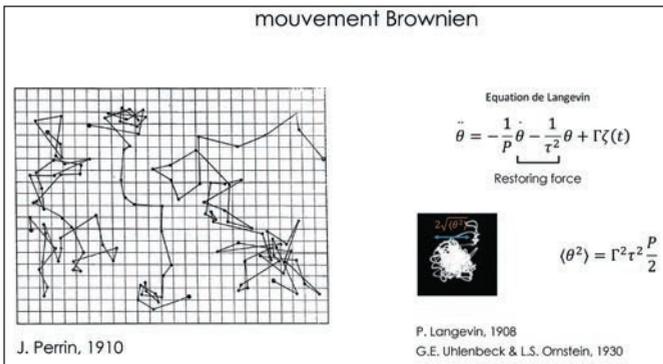


Figure 9

Équation de Langevin et mouvement brownien, ou description mathématique d'un mouvement uniforme entre deux chocs aléatoires, qui sont les seules sources de perturbation.

essayer de comprendre les effets de la force de l'arc.

La phase suivante est l'examen des clichés de la direction que pointe la flèche, et en particulier les traces proches du point d'impact (Figure 8). En résulte la remarque classique : «Tiens, ça ressemble vraiment au mouvement

brownien¹ qu'on observait avec du pollen dans de l'éthanol.»

Nous avons donc fait appel à la description physique connue du mouvement brownien utilisant l'équation de Langevin (Figure 9), mais ne rentrons pas ici dans le traitement mathématique.

Dans le processus de la visée, il y a du bruit mais aussi, simultanément, du contrôle : on veut viser un endroit donné, mais d'une part une force de rappel et d'autre part une force d'amortissement influencent le résultat.

Regardons la « pelote », comme on désigne ce petit nuage de points autour de l'impact. La physique nous donne les informations sur les paramètres de la pelote. Plus le temps caractéristique de contrôle est court, plus la pelote sera petite ; de la même façon, plus le temps caractéristique de l'amortissement sera court, plus petite sera la pelote. Évidemment, plus grand sera le bruit, plus grande sera la pelote. L'examen de la pelote informe sur la « perturbation à la cible » et la « précision à la cible » rattachées à deux paramètres : le « **bruit humain** » et le « **bruit aérodynamique** » qui donnent accès à l'optimum qui nous intéresse (Figure 10).

On peut ainsi résumer les comportements : si la force de l'arc est plus forte, la perturbation à la cible sera plus forte et le bruit humain va croître. De même, plus la

1. Une description mathématique du mouvement aléatoire d'une «grosse» particule immergée dans un liquide et qui n'est soumise à aucune autre interaction.

force de l'arc est grande, plus la vitesse de départ est importante, et donc plus le temps d'interaction entre la flèche et l'air est court. Et le bruit aérodynamique diminue.

Les résultats de ces examens et mesures sur la performance de Florian sont présentés sur la **Figure 10** qui trace le bruit humain et le bruit aérodynamique en fonction de la force de l'arc. L'optimum se déduit du bruit total, somme des deux composantes, et correspond à son minimum. Nos expériences ont calculé pour Florian, ce jour-là, un optimum de 20 kilos pour l'arc. Mais attention ! Il y a une valeur d'optimum par jour et par archer, qui dépend de la forme physique et psychique de chacun. **Il y a chaque fois une caractéristique individuelle à coupler à une caractéristique du sport.**

3 Deuxième exemple d'étude : la science au service de la natation

Le deuxième exemple, ce sera la natation.

Les données viennent de la thèse de Charlie Prétot, qui a été encadrée par Rémi Carmigniani à l'École des Ponts (**Figure 11**). Les épreuves se sont déroulées dans le bassin de l'INSEP pour la natation et à la Fédération de handisport.

La thèse a été financée dans le cadre d'un programme dédié à la recherche sur le sport élite lancé par l'État en 2019 sous la gouvernance d'Édouard Philippe, Premier ministre. Le financement total prévu, de 20 millions d'euros, a financé 12 projets sur quatre ans.

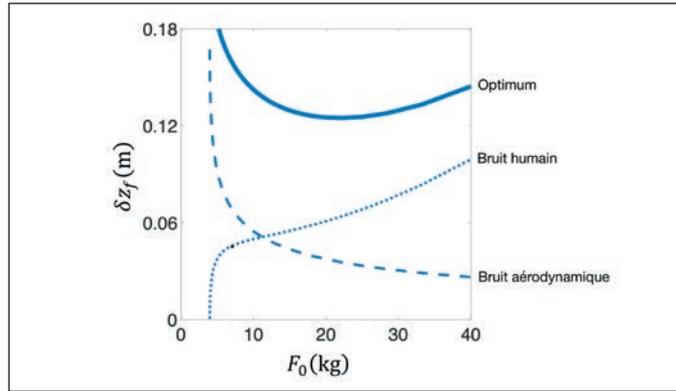


Figure 10

Optimum entre le bruit humain et le bruit aérodynamique.

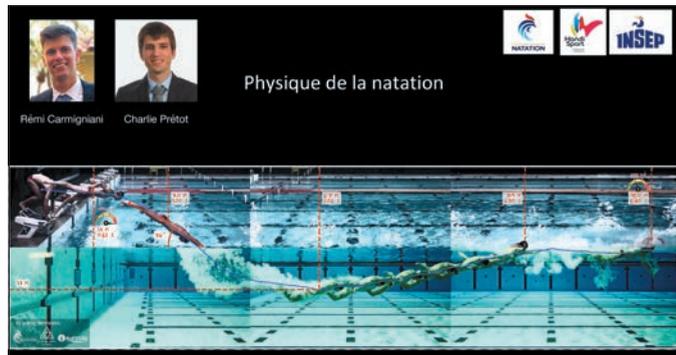


Figure 11

Thèse sur la physique de la natation.

3.1. L'étude

La recherche a été conduite avec la participation de Michel Chrétien, l'entraîneur de Maxime Grousset. Il a été décidé de travailler sur les départs, parce qu'en regardant les champions, on voit que ce n'est pas dans la phase de nage que les progrès se sont faits, mais dans les phases de départ et dans les phases de virage.

En pratique, avec les indications de l'entraîneur, on

récolte les informations sous forme de vidéos et de films qui permettent de rapidement déduire les caractéristiques physiques du plongeon et du virage, puis de reconstituer les différentes phases au cours desquelles les efforts peuvent être adaptés et personnalisés.

Un exemple : la tête va rentrer à 3,6 mètres du plot, l'entrée se fait à une vitesse de 6 mètres par seconde, donc à trois fois la vitesse de nage. Résultat : au début, le nageur est au repos avec une phase sous-marine de glisse, puis au bout d'un moment, il s'active (**Figure 12**). Le nageur doit décider à quel moment il s'active et se régler pour remonter à 15 mètres, que ce soit dans l'entrée ou pour les virages. Quinze mètres, c'est la règle choisie pour qu'on puisse bien voir et photographier les nageurs.

précisément la trajectoire qui a été suivie, le moment où le nageur s'active, les réalisations des plongeurs, des virages... L'analyse est faite en deux ou trois jours de façon à fournir rapidement quelques chiffres caractéristiques à l'entraîneur (voir chapitre d'Adrien Sedeaud). Des méthodes numériques particulières (réseaux de neurones) ont été mises au point pour cela. Des propositions argumentées sur l'optimisation sont communiquées à l'entraîneur et au sportif.

Dans une deuxième phase, des analyses scientifiques des données plus complètes, incluant des comparaisons avec d'autres cas, sont faites. Elles ne concernent plus le nageur directement, mais donnent l'occasion de contacts fructueux, qui font progresser le domaine, entre entraîneurs et physiciens.

3.2. Le modèle

Dans ce processus d'étude, la captation vidéo puis le traitement des données permettent de récupérer les bons paramètres pour décrire

4 Troisième exemple d'étude : la science au service du cyclisme

Le cyclisme a été l'un des douze projets financés. Il y a

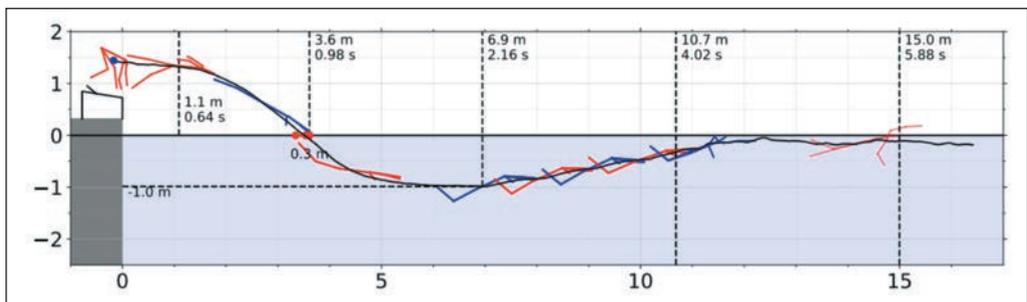


Figure 12

Modélisation de la trajectoire du nageur.

cinq disciplines en cyclisme : la route avec deux épreuves (le contre-la-montre et la course), le BMX (freestyle et race), le Mountain Bike (donc le VTT) ; et le Track, avec au total douze épreuves. Il n'y a pas d'épreuves mixtes, il y a donc deux médailles à chaque fois (hommes et femmes), soit vingt-deux médailles au total en cyclisme (Figure 13).

4.1. Point historique

L'épreuve traitée en exemple est «route et piste». En fait, ces deux épreuves sont couplées depuis le début et traitées ensemble.

Initialement, dans le cyclisme, il y avait les épreuves en vélodrome. Le vélodrome est une ancienne piste qui est fermée où on peut mettre au point des épreuves à techniques sophistiquées, particulièrement difficiles.

L'épreuve la plus dure au vélodrome est l'«**épreuve des six jours**» qui a connu la célébrité pendant de nombreuses décennies. La règle est très simple : celui qui parcourt le plus de kilomètres en six jours gagne. Il y a un optimum à trouver entre le nombre de kilomètres, le temps de sommeil et la fatigue. Historiquement, l'optimum a été réalisé par Major Taylor qui parcourait 2300 kilomètres en six jours. Les «six jours du vélodrome» vont être le point de départ du **Tour de France qui a été explicitement créé pour faire plus dur que le plus dur**. Au début, le Tour de France se faisait donc en six jours (Figure 14), dans des conditions difficiles, car il y a des montagnes, du vent, etc. Donc,



Figure 13

Répartition des épreuves de cyclisme.

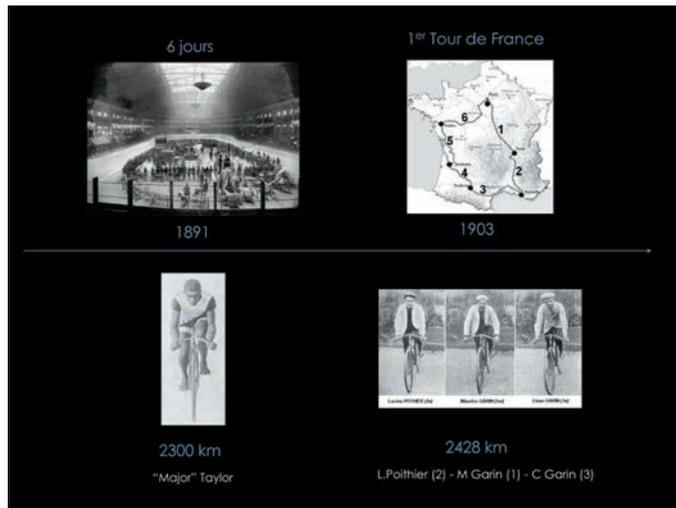


Figure 14

Histoire du cyclisme.

en 1903 : première étape, Paris-Lyon, deuxième étape, Lyon-Marseille, troisième étape, Marseille-Toulouse, quatrième étape, Toulouse-Bordeaux. Bordeaux-Nantes

2019	Leader	Grimpeur	Sprinter
 3 366 km	 Egan Bernal 22 y.o. 1.75 m 60 kg 40,576 km/h	 Romain Bardet 29 y.o. 1.84 m 65 kg	 Peter Sagan 29 y.o. 1.82 m 79 kg
 3 546.8 km	 Richard Carapaz 26 y.o. 1.70 m 62 kg 39.41 km/h	 Giulio Ciccone 24 y.o. 1.76 m 58 kg	 Pascal Ackermann 25 y.o. 1.80 m 78 kg
 3 291 km	 Primož Roglič 30 y.o. 1.77 m 65 kg 39,587 km/h	 Geoffrey Bouchard 27 y.o. 1.77 m 64 kg	 Primož Roglič 30 y.o. 1.77 m 65 kg

Figure 15

Grandes courses cyclistes de 2019 et maillots associés.

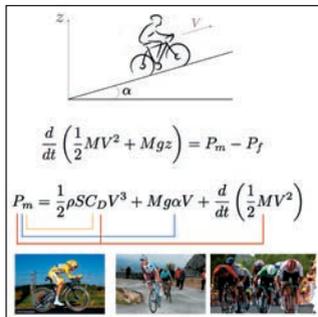


Figure 16

Répartition de l'énergie physique d'un cycliste.
 P_m : puissance du cycliste.
 En jaune : friction aérodynamique.
 En bleu : gravité.
 En rouge : variation temporelle d'énergie cinétique.

pour la cinquième et on revient sur Paris pour la sixième. **Génétiquement, ces deux épreuves, les « Six Jours » et « Le Tour de France », sont couplées.** Cela étant, ces deux épreuves ont évolué différemment.

4.2. Le cyclisme de route

Il y a trois grands tours définis par l'UCI² : le Tour de France, le Giro italien et la Vuelta espagnole (Figure 15). Dans chacun de ces tours, on décerne trois maillots, quel que soit le tour : un pour le leader, un pour le grimpeur, un pour le sprinter. Il y a aussi le maillot blanc du meilleur jeune.

L'objectif fixé au physicien est de connaître et comprendre les facteurs qui jouent sur les performances du cycliste qui dispose, à la base, de son énergie mécanique, composée de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle (Figure 16). Ce qui va faire varier cette énergie mécanique

au cours du temps, c'est la puissance qu'injecte l'athlète, diminuée de la puissance qui se dissipe par friction. Mais la puissance mécanique de l'athlète va être une caractéristique individuelle.

Les trois maillots caractérisent la puissance mécanique de l'athlète : le meilleur rouleur (celui qui gagnera les contre-la-montre et finira maillot jaune), le meilleur grimpeur et le meilleur sprinter. Donc, les trois maillots ont une origine physique. On voit que les sciences et le sport, malgré les apparences, sont très liés.

C'est ce couplage qui est étudié en vue de l'optimiser et de proposer ces optimisations aux entraîneurs qui en feront ce qu'ils voudront.

4.3. Le vélodrome

La Figure 18 indique les différentes courses qui se déroulent dans un vélodrome. Pour chacune d'entre elles, l'adaptation entre l'athlète et l'objectif est spécifique. Le physicien va traduire ces spécificités en recommandations aux athlètes qui devront optimiser leurs performances en fonction de leurs caractéristiques personnelles et de celles de leur matériel.

Les **sprinters** vont avoir trois épreuves aux Jeux de Paris (Figure 18). Le match, c'est l'épreuve du chat et de la souris. Pour savoir qui fait le chat et qui fait la souris, il y a un classement préalable. Cela s'appelle le « 200 mètres lancés » : le cycliste parcourt 1 kilomètre, mais seuls les 200 derniers mètres sont chronométrés. Celui qui fait

2. Union Cycliste Internationale.

LE VÉLODROME NATIONAL

Quand vous rentrez dans le vélodrome, voici ce que vous voyez (Figure 17). Au milieu, c'est le paddock, là où sont les vélos. Puis il y a une piste sur laquelle plusieurs zones sont tracées. La partie verte, c'est la zone de sécurité. Vous ne pouvez pas y rouler, sauf quand vous tombez. La partie bleue, c'est la côte d'azur. Vous pouvez y rouler, mais vous ne pouvez pas y rester.

Ensuite, commence la piste. Elle a une largeur constante tout au long, qui n'est pas fixée et peut varier entre 6 et 7 mètres.



Figure 17

Le vélodrome.

Sur cette piste, vous avez différents traits. Le trait du bas (la ligne noire) fixe la longueur nominale du vélodrome : 250 mètres pour les vélodromes olympiques. Le trait rouge, c'est la ligne des sprinters. Toutes les épreuves de sprint se passent entre la noire et la rouge. La ligne bleue, c'est la ligne des stayers. Et puis, le plus haut possible, c'est la balustrade.

Dans les lignes droites, la pente est de 14 degrés : le haut de la balustrade est donc à 2 mètres du sol. Dans les virages, la pente est de 45 degrés et le haut de la balustrade est à 5 mètres du sol. Suivant la discipline, les athlètes vont parcourir soit le bas de la piste, soit le haut, selon les épreuves.

		piste				
		Match sprint 200 m fly + match	Team Sprint	Keirin		
Sprint					< 1 min < 1 km	65km/h < U < 80 km/h
		Team pursuit	Omnium	Madison		
Endurance					> 4 min > 4 km	55km/h < U < 65 km/h

Figure 18

Différents types de courses en vélodrome.



Figure 19

On retrouve des athlètes des courses d'endurance dans le Tour de France.

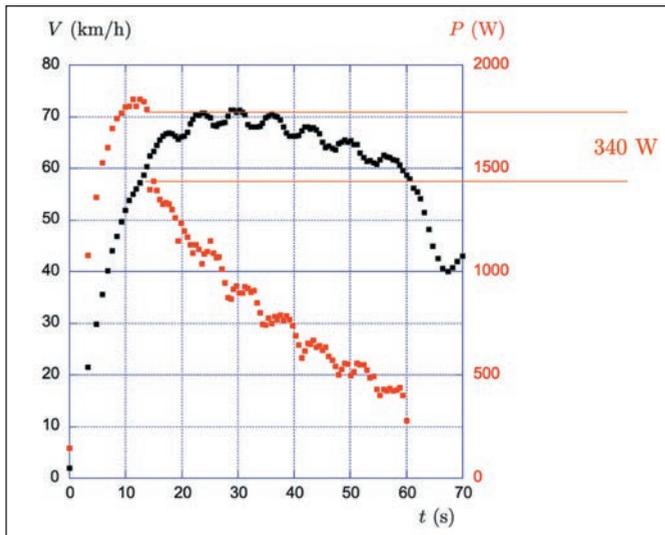


Figure 20

Vitesse du cycliste lors d'une course (la finale du « kilomètre » de Melvin Landerneau) (en noir) et puissance déployée (en rouge) en fonction du temps.

le meilleur temps est classé premier, le 32^e temps est classé 32^e. Dans les matches, le premier va affronter le 32^e; le 2^e, le 31^e, etc. Les sprinters

roulent à des vitesses caractéristiques entre 65 et 80 km/h, et ne parcourent jamais plus d'un kilomètre. La durée maximale de leurs épreuves, c'est la minute. Ce sont donc des athlètes qu'on ne voit jamais sur le Tour de France : ils font des efforts très intenses mais très courts.

Ensuite, il y a la **course de vitesse par équipe, le Keirin**. C'est une épreuve en peloton de sprint.

Dans les **courses d'endurance**, il y a trois épreuves : la **poursuite par équipe**, l'**omnium** et la **Madison**. Les athlètes sont les coureurs que vous voyez sur le Tour de France (Figure 19).

Benjamin Thomas, l'un des leaders de l'équipe française de poursuite, fait à la fois le Tour de France et les épreuves de piste. Les vitesses caractéristiques se situent entre 55 et 65 km/h. Les distances commencent à 4 kilomètres pour la poursuite et peuvent monter jusqu'à 50 kilomètres pour la Madison. Avec une distance totale de 50 kilomètres et le tour du vélodrome qui mesure 250 mètres, ça fait 200 tours de piste !

Le travail du physicien est d'observer ces athlètes pendant toutes ces différentes épreuves pour répondre aux questions des entraîneurs. Par exemple, l'une des questions principales pour les sprinters, ou même pour les endurants, est : « Quel braquet³ mettre pour la course demandée ? »

Il faut réaliser, pour bien comprendre, que les vélos utilisés pour ces épreuves n'ont pas

3. Combinaison pignon/plateaux.

de changement de vitesse et n'ont pas non plus de freins : ils sont « pignon fixe ». Ce sont des vélos très rudimentaires dans leur conception. Il y a une jauge minimale pour le poids, c'est 6,8 kilos, un minimum. À partir de là, les différentes équipes travaillent et choisissent le design. Et les questions que pose l'entraîneur sont : « Qu'est-ce que je mets comme plateau avant ? », « Qu'est-ce que je mets comme pignon arrière ? », pour une course donnée, pour un athlète donné.

La mesure décidée par le physicien commence en instrumentalisant les manivelles pour récupérer les données à la fois sur la cadence et sur la vitesse. La **Figure 20** correspond à une course de Melvin qui court le kilomètre. Il monte jusqu'à 72 km/h à partir d'un départ arrêté, puisque « le kilomètre », c'est un départ arrêté !

Les petits points dont est faite la courbe sont des moyennes sur un tour de pédale. Par ailleurs, on récupère aussi la puissance. En l'occurrence, le coureur Melvin monte jusqu'à 1700 watts. Au bout d'un moment, on voit qu'il y a une chute de 340 watts, c'est le moment où il s'assoit : il passe de danseuse à assis. Il y a une autre caractéristique, évidemment, c'est qu'il se fatigue, et donc sa puissance diminue sur le kilomètre. Elle va passer de 1700 à 400 watts à la fin du kilomètre.

Les courbes de vitesse de la **Figure 20** font apparaître des oscillations. On en compte huit, ce qu'on peut corrélérer aux tours de piste : un kilomètre, c'est quatre tours de

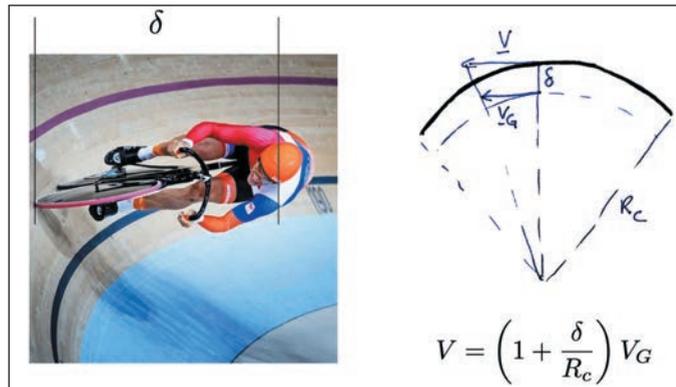


Figure 21

Physique du tournant dans les virages du vélodrome.

piste (puisque la piste fait 250 mètres), et un tour de piste, c'est deux virages. On est donc bien à huit en comptant une oscillation par virage.

Cette corrélation permet d'expliquer les oscillations : dans les virages, l'angle de piste est très relevé, si bien que le corps solide a une partie plus proche du centre de la trajectoire que les roues. C'est ce qu'on voit sur la **Figure 21**. Le centre de gravité du cycliste sur son vélo s'est écarté dans les virages d'à peu près un mètre. Le rayon de courbure du virage, c'est 20 mètres. Cela entraîne une différence de $1/20^\circ$, c'est-à-dire 5 %, sur la vitesse, ce qui est conforme à l'ordre de grandeur observé dans l'évolution des vitesses de Melvin.

Réaction supposée du lecteur de ce chapitre : on commence à comprendre un petit peu la dynamique, on voit qu'il y a des effets de virage par une équation qu'il sera possible d'adapter et d'utiliser sur des épreuves plus compliquées. Quant à nous, restons-en là et continuons sans équations.

A. L'épreuve de vitesse par équipe

La vitesse par équipe est l'une des épreuves les plus surprenantes (Figure 22). Elle se court à trois. Il ne s'agit pas d'une compétition entre les trois cyclistes, car l'objectif est de réussir le meilleur temps



Figure 22

Équipe française de vitesse par équipe.

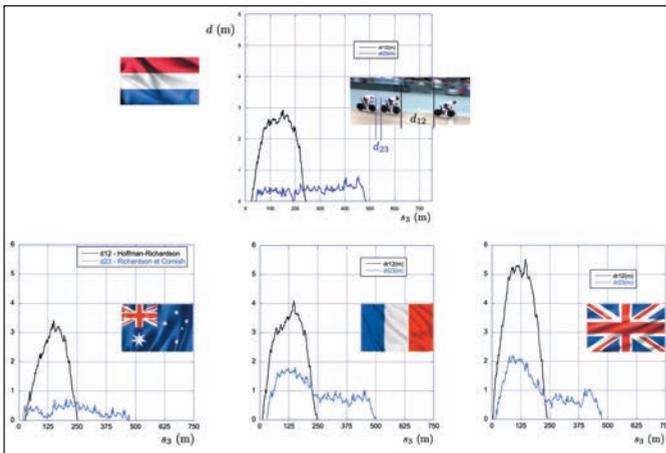


Figure 23

Graphe des distances entre les trois cyclistes en fonction de leur position dans la course pour 4 pays.

pour l'équipe, c'est-à-dire pour le premier arrivant. La stratégie adoptée par les équipes de trois cyclistes apparaît comme étonnante au départ.

Les trois coureurs de l'équipe partent tous ensemble. Le premier fait un tour en tête, puis il s'écarte. Vient ensuite le deuxième, qui le rattrape, fait un tour en tête puis s'écarte. Donc le premier fait 250 mètres, le second fait 500 mètres. Le dernier fait 750 mètres ; c'est son temps qui compte pour la compétition. Les coureurs ne sont pas autorisés à se doubler, et c'est ce qui détermine leur stratégie.

La Figure 23 analyse la course que nous venons de citer en représentant la variation des distances entre les coureurs en fonction de la distance parcourue. La distance 1-2 entre le 1 et le 2 est tracée en fonction de la position du 3, qui va faire ses 750 mètres. Elle augmente jusqu'aux 125 mètres, qui correspondent au demi-tour de piste, puis se referme. Et 2 et 3 vont rester à peu près à une distance de roue l'un de l'autre. Cette stratégie va être la même, quelle que soit la nation concernée.

Cette stratégie « étonnante » a été délibérément construite, introduite aux JO de Sydney en l'an 2000. Dans les stratégies antérieures, les trois coureurs « se suivaient » de façon à se protéger des contraintes aérodynamiques. Mais dans cette stratégie, au moment du passage de relais, soit au bout d'un tour, la vitesse du deuxième est la même que celle du premier. Et comme on ne peut se doubler avant le passage de la ligne, on ne peut construire

aucun gain de vitesse. Cette stratégie consistant à se suivre a donc été abandonnée et remplacée par la stratégie représentée sur la **Figure 24** qui offre l'avantage d'obtenir une plus grande vitesse pour le trio.

Sur la **Figure 24**, on voit Timmy Gillion en démarreur, avec la courbe noire, qui représente la vitesse en fonction du temps ; les barres, ce sont les tours. On finit le premier tour (barre noire), on finit le deuxième tour (barre bleue), on finit le troisième tour (barre rouge). Au moment du passage de relais, la vitesse de Timmy Gillion est de 6 km/h de moins que celles de Sébastien Vigier et de Melvin Landerneau. La stratégie nouvelle est une façon de ne pas se doubler, mais d'avoir tout de même une vitesse du relayeur plus grande que celle du démarreur.

Essayons de mettre ce raisonnement en modèle physique. À $t = 0$, la vitesse du démarreur est nulle, c'est un départ arrêté, donc elle va monter vers une valeur maximale. On peut définir le temps que va mettre le démarreur pour arriver au bout de 250 mètres. L'aire sous la courbe, c'est celle que vous obtenez quand vous intégrez la vitesse par rapport au temps, donc la distance parcourue, et donc exactement 250 mètres.

Lorsque le relais est parfait, la distance parcourue par le deuxième sera la même : deux parcours de 250 mètres. Donc l'aire sous la courbe du deuxième doit être aussi de 250 mètres. Mais le but de l'épreuve veut que la vitesse du deuxième au moment du passage soit plus grande que

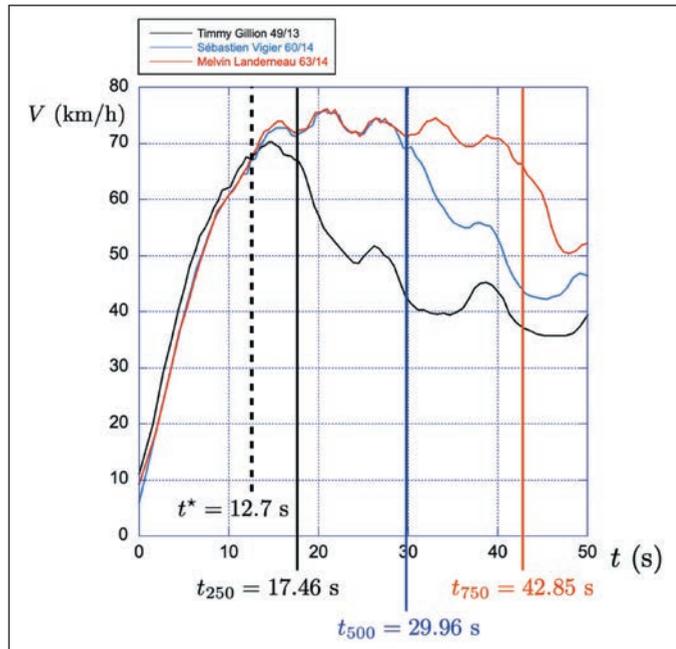


Figure 24

Évolution des vitesses des trois Français lors d'une course de vitesse par équipe.

la vitesse du premier, mais que l'aire sous sa courbe soit la même. On n'a donc pas le choix : il faut que les deux courbes se coupent. Il y a donc une partie de la course où V_2 sera plus petit que V_1 , c'est-à-dire que le relayeur sera en retard sur le démarreur, puis la suivante où il va le rattraper (**Figure 25**). C'est ce qu'on appelle le « **sprint décollé** ».

Cette invention de nouvelle stratégie est entièrement à mettre au crédit des sportifs. En revanche, le physicien peut dégager la loi à laquelle la course obéit et l'optimiser. Et il peut souvent rassurer l'athlète en lui confirmant : « Ce que vous faites, c'est vraiment l'optimum, c'est exactement ça qu'il faut faire. »

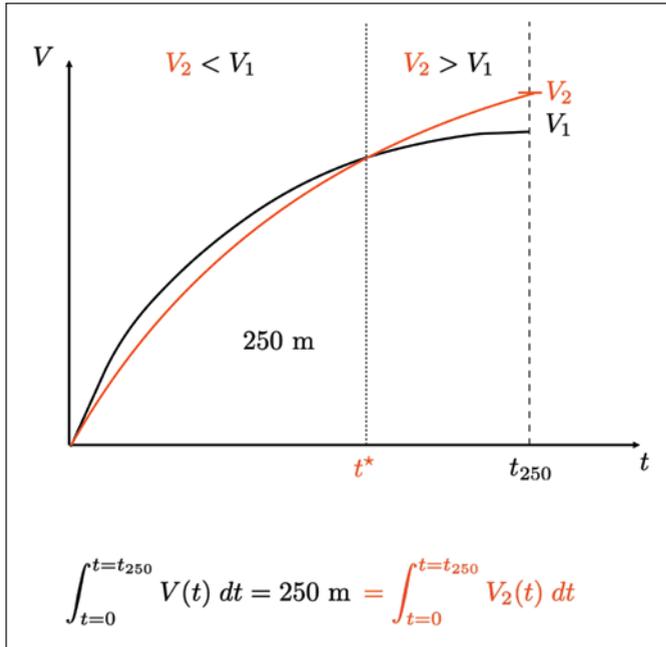


Figure 25

Évolution des vitesses d'un relayeur (V_2 , en 2^e position) et d'un démarreur (V_1 , en 1^{re} position) lors d'une course de vitesse par équipe.

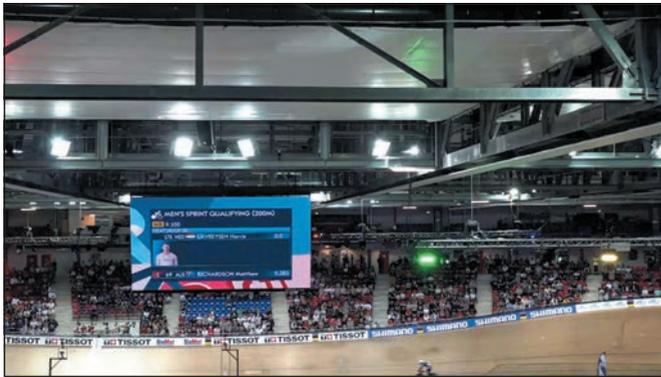


Figure 26

Le champion olympique Harrie Lavreysen lors des qualifications aux JO.

B. L'épreuve de 200 mètres lancés

Examinons le « 200 mètres lancés ». Les athlètes courent 1 km ; seuls les 200 derniers mètres sont chronométrés. On doit donc rentrer le plus vite possible, et pour cela utiliser la hauteur de chute de la piste.

Pour le préparer, l'athlète est sur la partie haute, donc à la balustrade. Puis il plonge : il est à 82 km/heure. Dernier virage, et quand il passe cette ligne, c'est le début du chrono. C'est un départ lancé. Puis il roule, en veillant à ne pas se faire éjecter dans le deuxième virage, et il franchit la ligne. Dans le cas de Harrie Lavreysen, la vitesse moyenne sur l'ensemble des 200 mètres était de 78 km/heure. Florian Rousseau, qui a la charge de l'optimisation de la performance, demande au physicien d'utiliser ses connaissances, et notamment de caractériser la position de Harrie Lavreysen par rapport à la concurrence. C'était son injonction à Glasgow en 2023 (Figure 26). La première idée, bien sûr, c'est de récupérer des données.

Le résultat des mesures de position et de vitesse est reporté sur la Figure 27 pour les cinq virages de préparation avant la plongée finale. Ces virages, c'est le parcours qui part de la balustrade ; de là, il plonge et fait son 200 mètres. Chaque plongée du cycliste du haut de la piste (environ 5 mètres) vers le bas (environ 1,8 mètre) lui fait gagner de la vitesse. Celle-ci atteint sa valeur maximale au début de la zone rouge qui marque le début du décompte du temps de la performance.

En noir, c'est la hauteur mesurée sur l'axe de gauche tracée en fonction du temps. En rouge, c'est l'énergie évaluée pour Harrie Lavreysen (qui dépend donc de sa vitesse). Deux phases sont observées : une phase lente qui se fait à peu près à 238 watts et une phase rapide qui contient le 200 mètres et qui se fait aux alentours de 1400 watts sur 30 secondes d'effort.

Ce qui a surpris l'équipe de physiciens, c'est de le voir monter quatre fois. On comprend que l'athlète utilise la hauteur de la chute finale pour avoir une vitesse importante, mais pourquoi le faire quatre fois ?

Cet exemple très classique permet de le comprendre.

Prenons deux particules : l'une qui se déplace sur une piste toute droite et l'autre qui prend une bosse (Figure 28).

Dans un premier exemple, on suppose l'absence de friction. L'énergie mécanique va alors se conserver. La bille franchissant la bosse est allée moins vite au sommet puisqu'elle est en train de stocker de l'énergie sous forme potentielle. À l'extrémité du parcours, elle a restitué cette énergie et accroît sa vitesse qui est redevenue égale $V_2(0)$ grâce à l'absence de friction.

En présence d'un facteur de friction qui croît avec la vitesse, la même expérience donnera une vitesse supérieure à la bille qui a franchi une bosse, car elle aura moins perdu d'énergie de friction.

C'est tout le principe du gain de vitesse de Harrie Lavreysen.

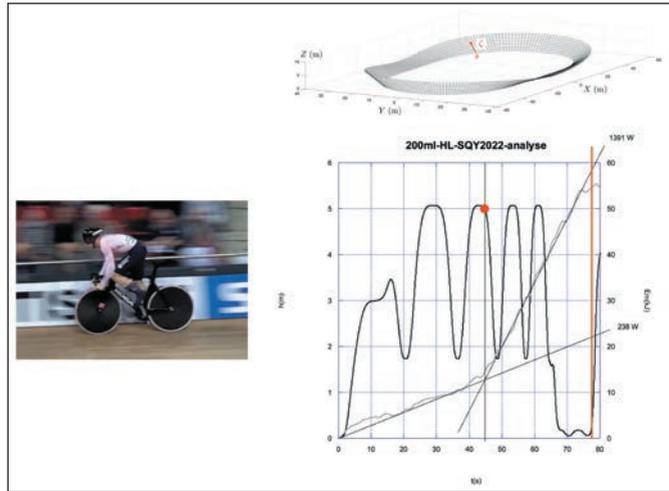


Figure 27

Évolution de la hauteur et de la vitesse du cycliste Harrie Lavreysen avant de plonger lors d'une épreuve de 200 mètres lancés. En noir, sa hauteur sur la piste latérale du vélodrome. En rouge, sa vitesse mesurée sur le capteur. La mesure du temps de la performance intervient à la fin de la zone rouge qui mesure 200 mètres.

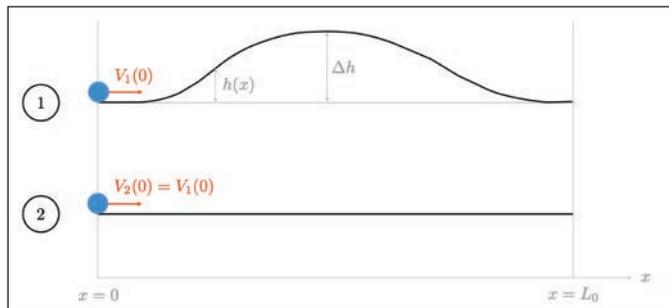


Figure 28

Simulation de la trajectoire et des paramètres dynamiques d'une particule suivant 2 trajectoires différentes.

Conclusion

Ce dernier exemple du 200 mètres lancés de Harrie Lavreysen symbolise le rôle et la méthode de travail des physiciens avec les sportifs.

En s'appuyant sur les mesures relevées en direct, le physicien peut construire des modèles complexes puis modéliser toute situation prometteuse, varier les conditions des épreuves, sélectionner des capteurs mieux appropriés. En fin de compte, il peut fournir à l'athlète les conditions d'un optimum pour son épreuve. Mais, en variant les modèles, il peut également imaginer avec les sportifs des techniques originales pour les épreuves classiques.

Toutefois, n'oublions pas la base : ce sont l'imagination et l'inventivité des sportifs qui, au cours des décennies, ont fait des merveilles pour améliorer les performances. Aller plus loin reste possible en leur ouvrant les merveilleuses possibilités de la physique et de la chimie et des moyens d'observation numériques.

Comment mettre les données au service du sport de haut niveau

D'après la conférence d'Adrien Sedeaud
www.mediachimie.org

Adrien Sedeaud est chercheur et adjoint au directeur de l'IRMES (Institut de Recherche Médicale et d'Épidémiologie du Sport), pôle Performance/INSEP (Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance).

Cette conférence a été réalisée à partir des données de l'ouvrage du même titre, paru aux éditions INSEP en 2024.

Introduction

Les données transforment notre quotidien. Ces évolutions impliquent la mobilisation de nouvelles ressources et la construction de nouveaux

savoirs et savoir-faire. Le monde de la performance sportive en est un exemple remarquable *via* l'émergence de technologies embarquées, de capteurs de toutes sortes, le développement de méthodes

d'analyses et des investissements financiers conséquents sur ce champ pouvant générer un avantage concurrentiel.

La conférence aborde différents exemples concrets réalisés par le pôle Performance de l'INSEP qui apportent des données dans le sport de haut niveau en se focalisant sur l'estimation de potentiels, le monitoring, l'estimation des risques de blessures ou encore l'analyse de la concurrence.



Figure 1

Image récupérée d'une vidéo d'un essai de rugby vu par un spectateur.



Figure 2

Image récupérée d'une vidéo d'un essai de rugby vue par un analyste des données.

Les **Figures 1** et **2** montrent un exemple du support scientifique qui peut être apporté aux staffs et aux athlètes des équipes de France à travers l'utilisation des données. La **Figure 1** est une image récupérée d'une vidéo où on voit un essai de l'équipe du rugby du Stade Rochelais qui joue en noir.

La **Figure 2** est celle récupérée à partir d'une vidéo réalisée par un analyste des données.

Dans le maillot de chaque joueur, entre les omoplates, il y a des capteurs GPS de 50 Hz, qui permettent d'obtenir 50 données par seconde sur les 3 axes. On mesure ainsi les accélérations et les décélérations. Le même type de données est capté lors des phases de préparation et aux entraînements. On dispose ainsi de beaucoup de données pour assurer un suivi de l'athlète et des équipes.

Les données sont omniprésentes, comme dans notre société, mais c'est peut-être un peu plus exacerbé dans le sport de haut niveau.

1 Utilisation des données dans le haut niveau

La **Figure 3** résume les principaux objectifs de l'utilisation de ces données par les équipes de l'INSEP.

Analyse de la concurrence

Les données obtenues à partir de la vidéo de la **Figure 2** permettent d'analyser les victoires et les défaites des adversaires des Français et de fournir des informations aux staffs des équipes de France. L'analyse qui leur est transmise permet

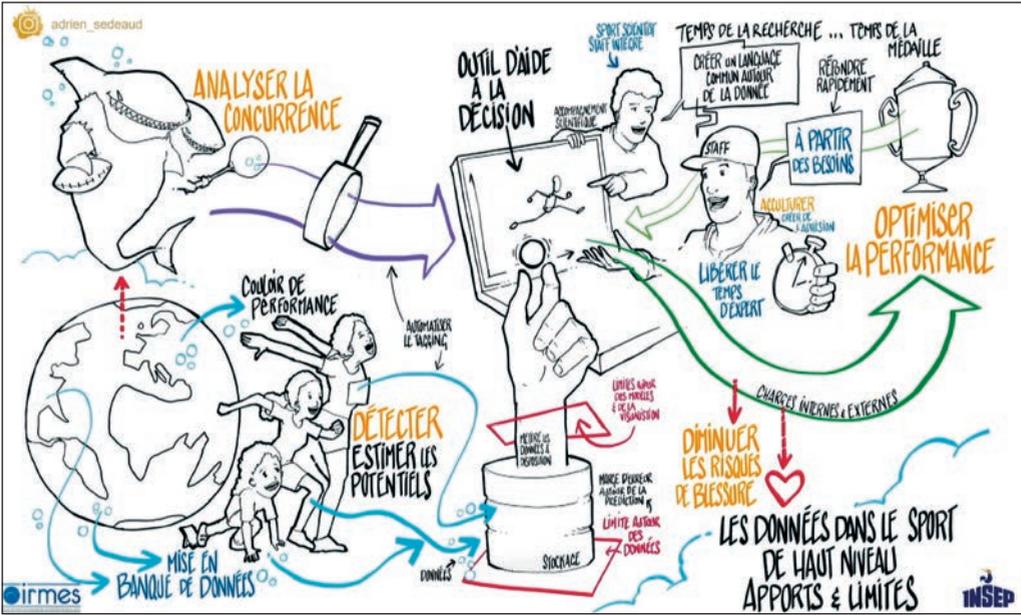


Figure 3

Schéma vulgarisant l'utilisation des données dans le sport.

d'accéder à l'ensemble des données que l'on peut capitaliser sur les adversaires, les façons dont ils perdent et gagnent, pour essayer de les mettre dans des schémas qui vont leur être défavorables, et qui vont être favorables aux athlètes français.

Détection des talents

L'IRMES crée des outils à partir des données pour aider les fédérations dans l'**estimation de potentiel**, afin de ne pas faire de la détection à un instant T du niveau de performance de jeunes athlètes qui sont assez peu prédictives d'une performance future. Sont ainsi créés des **indicateurs** en fonction de différents paramètres d'analyses de performances dépendant de l'âge biologique, de l'âge relatif, et de l'âge d'entraînement.

Optimisation des performances

Énormément d'informations sont capitalisées avec deux objectifs principaux : optimiser la préparation des athlètes pour gagner en performance et faire de l'estimation de risques de blessures pour éviter le seuil fatidique à très haut niveau, lorsque l'athlète qui atteint son optimum de performance est sur une ligne de crête où il est très proche de ce risque de blessure.

Outils d'aide à la décision

Ces données doivent pouvoir être utilisées pour répondre aux questions des entraîneurs et des athlètes. Ce sont des outils d'aide à la décision et il faut choisir en conséquence les variables à mesurer sur les capteurs, les outils pour les capter, leur restitution et la visualisation ou la modélisation

qui peut être fournie à partir de ces données et voir comment les utiliser pour améliorer la performance.

L'apport est concomitant des limites et le devoir déontologique implique d'expliquer tous les biais qui peuvent être incorporés. On ne capte qu'une partie des informations qui font la pluralité des performances. Plus le travail est fait en collaboration avec les staffs, plus les données sont des outils d'aide à la réflexion plus qu'à la décision, parce qu'elles fournissent souvent plus de questionnements.

1.1. Détections des talents : outils d'estimation de potentiel

Trois biais importants à prendre en compte sont encore aujourd'hui très peu considérés par l'ensemble des fédérations : l'âge relatif, l'âge biologique et l'âge d'entraînement (Figure 4).

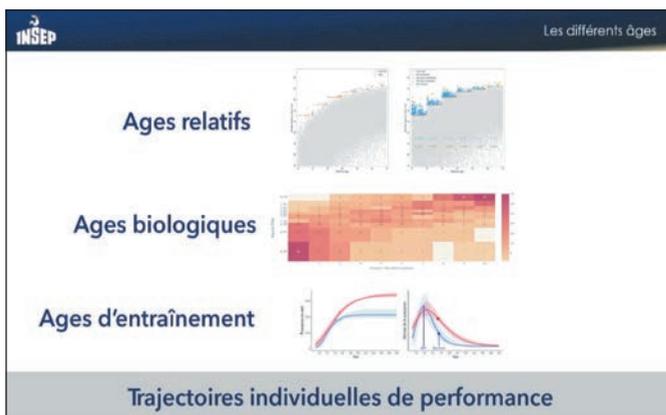


Figure 4

Présentation des 3 biais liés aux âges dans les trajectoires individuelles des performances des jeunes athlètes.

Âge relatif/âge biologique

Que ce soit au niveau départemental et régional, mais aussi – et surtout – au niveau des équipes de France jeunes, il y a une répartition non homogène des mois de naissance des enfants sélectionnés pratiquant une activité sportive, avec beaucoup plus d'individus nés en début d'année qu'en fin d'année, et ce dans tous les sports. C'est ce qu'on appelle l'« effet de l'âge relatif ».

Parce qu'ils sont relativement plus vieux en âge, ces enfants sont aussi biologiquement plus vieux. C'est le deuxième effet, celui de l'**âge biologique** : il peut ainsi y avoir un an et 364 jours de différence d'âge biologique entre deux enfants de la même année. Bien entendu, celui qui est plus vieux a des avantages considérables dans la pratique physique, mais aussi dans la coordination musculo-cérébrale. Cette maturation se fait à des timings individuels qu'il est facile aujourd'hui de mesurer et de fournir aux fédérations. Lorsque des tests ou des performances sont réalisés, les performances sont recalibrées en fonction de cet effet de l'âge relatif. Ainsi, on regarde quel est le niveau de performance pour l'individu qui a 12 ans et 1 jour, 12 ans et 2 jours, 12 ans et 3 jours, etc., et on recalibre la relation entre la performance et l'âge.

Ces premières étapes, qui ne sont pas chronophages pour les entraîneurs ou pour les staffs, puisqu'elles sont établies à partir d'une date de naissance et des performances, permettent de prendre conscience des biais de sélection. **L'athlète le plus**

âgé d'une catégorie sera alors plus performant qu'un athlète de la même catégorie, mais plus jeune.

Cela a permis notamment à la Fédération Française de Natation de réfléchir sur les individus qu'ils invitaient aux championnats jeunes, et donc de faire venir des jeunes athlètes qui n'ont pas, aujourd'hui, le niveau de performance en recalibrant leur performance. Dans la catégorie des 12-14 ans, la différence entre l'âge relatif et l'âge biologique sur le niveau de performance est très importante, pouvant atteindre deux années.

De même, la puberté agit et perturbe la performance des jeunes athlètes.

Au moment du pic pubertaire croisé entre garçons et filles, les individus qui ont biologiquement passé leur pic pubertaire sont 100 % prêts pour exprimer leur plein potentiel alors que ceux qui sont avant le pic pubertaire sont prêts à 10, 20 ou 30 %. Donc cela fait concourir entre eux des individus qui n'ont absolument pas les mêmes capacités.

Il a été observé sur les quatre derniers championnats de France des catégories juniors que les individus les plus performants sont ceux qui ont passé le pic pubertaire depuis 4 ans et demi et que les individus les moins performants sont ceux en plein pic pubertaire.

La littérature scientifique sur ce sujet est abondante mais malheureusement encore peu utilisée aujourd'hui. Concrètement, sur le terrain, ces effets se retrouvent à tous les niveaux, et les

performances dans les catégories jeunes même juniors ne présagent pas d'une réussite future car ce sont des populations disparates, et les œillères sont posées sur les individus qui sont à un instant t les plus performants et pas sur ceux qui ont le potentiel de devenir les plus performants.

L'INSEP crée des équations de calibration pour que, en fonction de l'effet de l'âge biologique, on recalibre les performances existantes pour chaque discipline, sport ou épreuve dans les catégories U9, U10, U11, U12.

Âge d'entraînement

Si deux jeunes athlètes ont le même niveau de performance mais que l'un pratique l'athlétisme depuis un an et l'autre depuis six ans, les capacités de progrès ne sont pas les mêmes, mais cela aussi est encore très peu considéré. L'INSEP modélise donc la relation, pour chaque discipline, entre la performance et l'âge d'entraînement, ce qui permet de recalibrer.

1.2. Évaluation et optimisation des performances

La Fédération Française de Ski (FFS) a étudié l'évolution des performances des skieurs professionnels (selon des critères définis par la FFS) en fonction de leur âge tout au long de leur carrière. Un grand nombre de carrières ont ainsi été étudiées. À travers toutes ces trajectoires individuelles de performance, on observe une progression au fil des années, suivie d'un pic puis d'un plateau.

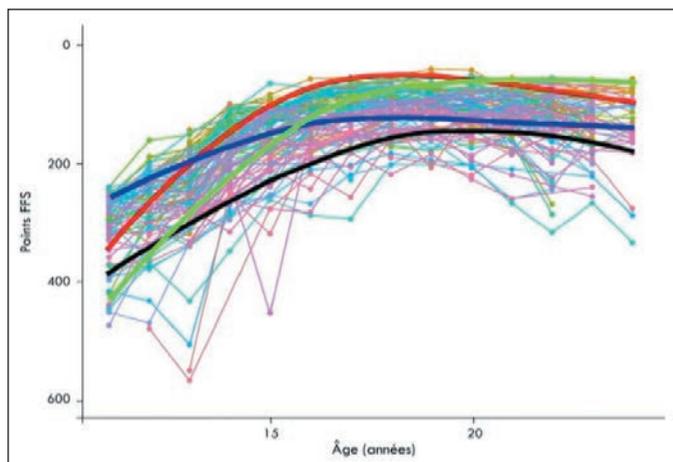


Figure 5

Les 4 trajectoires de performance les plus observées chez les sportifs tout au long de leurs carrières.

Meilleures performances annuelles (Points FFS) en fonction de l'âge des skieurs alpins français depuis la saison 2004-2005. Les points FFS correspondent à une performance relative dépendant du niveau global de la course et de l'écart au vainqueur de la course : plus les points sont faibles, plus la performance est élevée.

Que ce soit pour ces données dans le domaine du ski ou pour des millions de données en natation ou en athlétisme, on retrouve toujours quatre trajectoires lorsqu'on utilise des méthodes de classification (**Figure 5**).

Les individus avec la trajectoire noire ont des niveaux de performance assez faibles tout au long de leur vie. Ils sont bien détectés et continuent en pratiquant du sport santé. Les individus en bleu ont des niveaux de performance élevés dans les catégories jeunes ; ils sont très rapidement détectés et on leur propose en général d'intégrer, selon le sport, des centres de formation, des pôles France, et ainsi de suite, mais on s'aperçoit qu'en fait leurs niveaux de performance va stagner par la suite. Les individus en rouge ont des

niveaux de performance assez élevés quand ils sont jeunes ; ils sont donc repérés, puis ils continuent à progresser mais n'atteignent pas le niveau de champion olympique ou du monde.

Les athlètes sur lesquels il faut porter le plus d'attention sont ceux des courbes vertes. Ils ont des niveaux de performance faibles dans les catégories jeunes, mais s'ils poursuivent, ce sont ceux qui atteindront plus tard des niveaux dignes des champions du monde ou olympiques.

Il faut donc créer des outils pour tenter d'estimer ces trajectoires individuelles et construire des parcours de vie ou parcours de performance.

Sur la base des données de la FFS, l'INSEP a réalisé une modélisation mathématique de la trajectoire des skieurs pour estimer la trajectoire qu'un athlète pourrait suivre au cours de sa carrière à partir de quelques points de performance pour répondre à la demande des entraîneurs qui est toujours la même : **entre ces 50 athlètes qui ont le même niveau à 12 ans, à partir de 3 à 4 performances historiques, lequel peut potentiellement être le plus fort ?**

Cela permet aux sélectionneurs et aux entraîneurs d'avoir, dans un premier temps, des informations sur l'historique des performances des jeunes athlètes, puis d'étudier selon les différents athlètes sélectionnés les possibilités de trajectoire de chacun d'eux. Le but n'est pas de prédire une performance mais d'estimer l'ensemble des possibles, notamment pour des individus avec des niveaux de

performance plutôt faibles au début de leur carrière, mais qui pourraient atteindre des niveaux de champion du monde ou olympique (courbe verte de la **Figure 5**). Ce sont donc des pièces de puzzle qui constituent de nouveaux outils pour les entraîneurs et leur permettent de confirmer leurs intuitions.

La **Figure 6** est un exemple fictif du parcours de vie d'un jeune athlète.

Son niveau de performance est reporté en fonction de l'âge. Il débute à 3 ou 4 ans (par exemple au tennis), arrête, puis reprend et intègre une structure jeune de haut niveau. Il rentre ensuite dans un pôle France ou une académie, autour de son pic de vélocité de croissance, donc de son pic pubertaire. Il peut alors se blesser, mais reprendre et devenir professionnel, et atteindre un âge de pic de performance qui sera estimé. En plus des éléments vus précédemment, les études d'un grand nombre de cas ont permis d'estimer les facteurs qui ont le plus de poids en fonction des âges (**Figure 7**).

Pendant la jeunesse de l'athlète : le lieu de naissance et de vie

Très jeune, par exemple à 3 ans, lorsque l'athlète commence à jouer au tennis, la pratique délibérée, c'est-à-dire le jeu, est peut-être du point de vue de la coordination, ce qui permet le meilleur développement pour cette tranche d'âge. Vient ensuite le lieu d'habitation ou de résidence. De nombreuses études ont montré qu'il valait mieux être rural, ou en tout cas habiter dans des villes inférieures

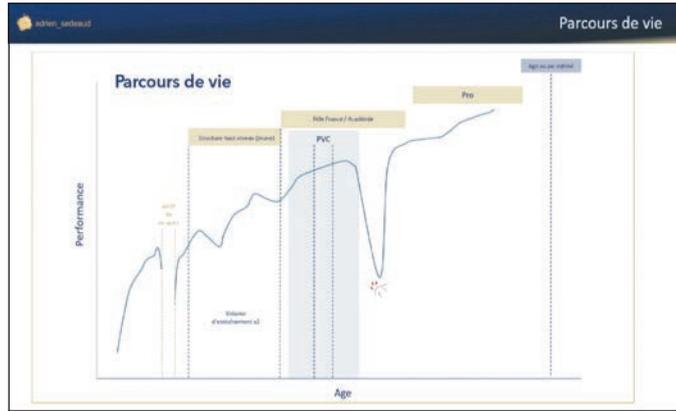


Figure 6

Parcours de vie possible pour un jeune athlète.

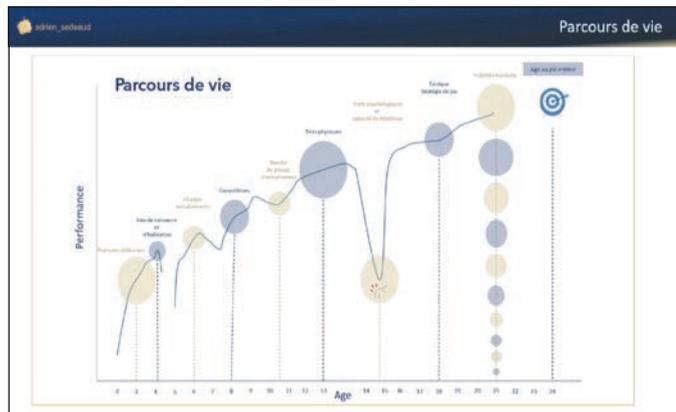


Figure 7

Parcours de vie possible pour un jeune athlète, en considérant les facteurs prépondérants pour sa carrière.

à 100 000 habitants, pour devenir champion olympique. Les explications possibles à ce constat sont que le jeune athlète a de nombreuses opportunités de se déplacer s'il habite à la campagne, où il ira à l'école à pied ou à vélo. De plus, s'il prend une licence dans le club de son village, il se verra proposer une multi-licence : il fera du tennis, mais sa licence

de tennis lui permettra de faire aussi de l'athlétisme, du judo et toutes les activités qui sont proposées.

La place dans la fratrie est aussi un élément essentiel : ce sont souvent les deuxièmes et troisièmes enfants les plus performants car ils passent beaucoup de temps à courir après le ou les grands frères et sœurs.

Au niveau de l'entraînement : l'impact des structures sportives de haut niveau et l'entrée dans le circuit professionnel

Les analyses des données montrent l'importance dans cette courbe de progression individuelle, des charges d'entraînement, des charges de compétition ainsi que la densité des groupes d'entraînement. Lorsqu'il entre dans une structure de très haut niveau, les coéquipiers des entraînements quotidiens vont fortement impacter la capacité de progression du jeune athlète.

Autour de l'âge du pic pubertaire, les capacités et les tests physiques sont nettement améliorés par le climat hormonal.

Les traits psychologiques et la capacité mentale de résilience peuvent être pertinents en cas de blessure.

Lorsqu'il entre sur les circuits professionnels, l'aspect tactique et la vision stratégique du jeu seront importants.

Il faut identifier de manière individuelle les éléments qui ont le plus d'importance dans une réussite future sur des individus très jeunes.

Puisque la performance est multifactorielle et complexe, il

faut essayer de percevoir tous ces éléments qui ont un impact sur le jeune athlète à 21 ans. Ces impacts sont récurrents, individuels et ils évoluent avec le temps. C'est ce que l'INSEP essaye de mesurer grâce à des modèles de plus en plus complexes, à partir d'informations sur des groupes d'individus pour comprendre individuellement l'impact de chacune de ces variables au cours du temps.

Sont ainsi construits des parcours de vie modélisés, afin d'estimer des possibilités pour un grand nombre d'athlètes. Cette modélisation est poursuivie notamment autour de l'âge du pic de performance estimé.

Estimer le niveau de performance des athlètes et des équipes

Ces estimations font partie des missions de l'INSEP et permettent de créer des couloirs de performance pour visualiser les trajectoires de performance des athlètes français.

Ce type de programme est réalisé avec les équipes de Florian Rousseau, Directeur de la performance du cyclisme sur piste et ancien athlète multimédaillé, 11 fois champion du monde et deux fois champion olympique.

Les meilleures performances des sauteurs à la perche, médaillés olympiques lors des 4 dernières olympiades, ont été reportées en fonction de l'âge (de 16 à 37 ans), chaque point étant la meilleure performance à 16 ans, 17 ans, 18 ans, 19 ans, et ainsi de suite pour tous ces athlètes. La synthèse de ces données a permis la

construction d'un couloir de performance, en vert sur la **Figure 8**. Pour les Jeux de Londres, cela a permis de visualiser où se situaient les athlètes français par rapport aux trajectoires communes des médaillés olympiques.

L'INSEP travaille aujourd'hui sur le programme « **Médaillabilité** », qui permet d'estimer la probabilité de l'ensemble des athlètes de la planète d'être champions olympiques demain. 30 millions de données sont reçues chaque nuit et mises à jour lors de toutes les compétitions internationales pour les catégories jeunes et les catégories seniors. Ces données sont exploitées par une équipe de 4 chercheurs qui analysent comment les athlètes français se situent par rapport à la concurrence internationale, afin de fournir des visualisations pour les décideurs et pour les staffs.

Ces programmes ne sont pas destinés à la prédiction mais à l'estimation.

Modélisation de scénarios de courses

Est ainsi établi un tableau de bord récapitulant les données recueillies sur un athlète et les prédictions de performance afin d'estimer ses chances de médaille.

Par exemple, la Fédération Française d'Athlétisme a financé des travaux de recherche pour construire le profilage des athlètes français avec une batterie de tests physiques et physiologiques à réaliser et toutes les informations sur les courses de l'ensemble de la planète aussi bien en

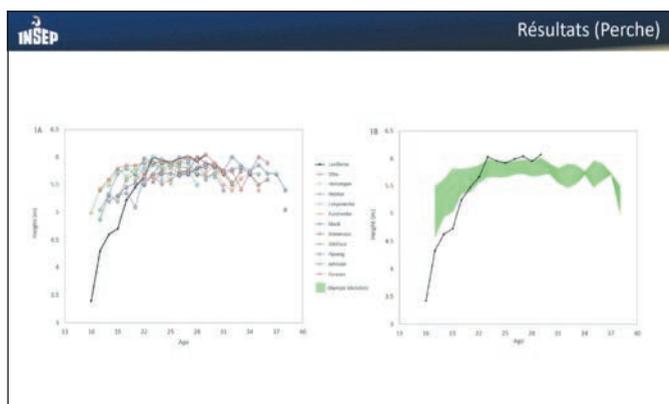


Figure 8

À gauche, les performances des sauteurs à la perche olympiques au cours des années. À droite, modélisation d'un couloir de performance issu de toutes ces performances.

termes de dénivelé, de nombre de virages, de distance que de performances des athlètes. **Le regroupement de toutes ces données permet de calculer des probabilités des scénarios de courses qui sont transmis aux coachs pour les aider dans leurs choix stratégiques et confirmer ou les rassurer dans leurs intuitions.**

Ainsi, pour l'épreuve de triathlon des Championnats d'Europe 2018, ce type d'étude avait montré que des nageurs allaient nager très vite pour essayer de créer les écarts de façon qu'il y ait, lors de la partie suivante en cyclisme, un peloton de tête et deux pelotons à la suite. Les simulations réalisées montraient qu'il fallait que l'athlète français sorte dans le premier groupe de tête en natation pour figurer sur le podium final. Les coachs savaient que les athlètes espagnols présents allaient nager très vite pour éliminer l'athlète français de la natation qui court très vite.

2 Monitoring des données

Les possibilités d'exploitation de toutes ces données sont nombreuses, comme le montre la **Figure 9** : optimisation de la performance, prévention des blessures, programmation de l'entraînement (charges d'entraînement, charges compétitives), etc.

Chaque terme de la **Figure 9** embarque derrière lui énormément de données. Par exemple, quand un staff demande d'intervenir pour avoir des informations sur le niveau de fatigue de ses athlètes, il y a de multiples façons d'étudier la fatigue : questionner pour en évaluer le niveau, effectuer un prélèvement salivaire pour avoir un ratio cortisol/testostérone, déterminer si c'est de la fatigue centrale

ou périphérique, c'est-à-dire cérébrale ou plutôt musculaire, ou de la fatigabilité, etc. Il faut donc faire des choix pour définir le type de données à capter et la façon de les capter, puis pouvoir et savoir les utiliser.

Des systèmes de gestion des athlètes centralisent les données.

Tout ce qui est capté est instantanément visible par les staffs et les athlètes, ce qui permet d'observer les cinétiques, l'évolution dans le temps et si elle sort de la variabilité individuelle.

Ensuite, le travail de recherche consiste à trouver les relations entre toutes les variables. L'hypothèse et la démarche consistent à aller chercher de l'information concernant des charges d'entraînement, des performances, des

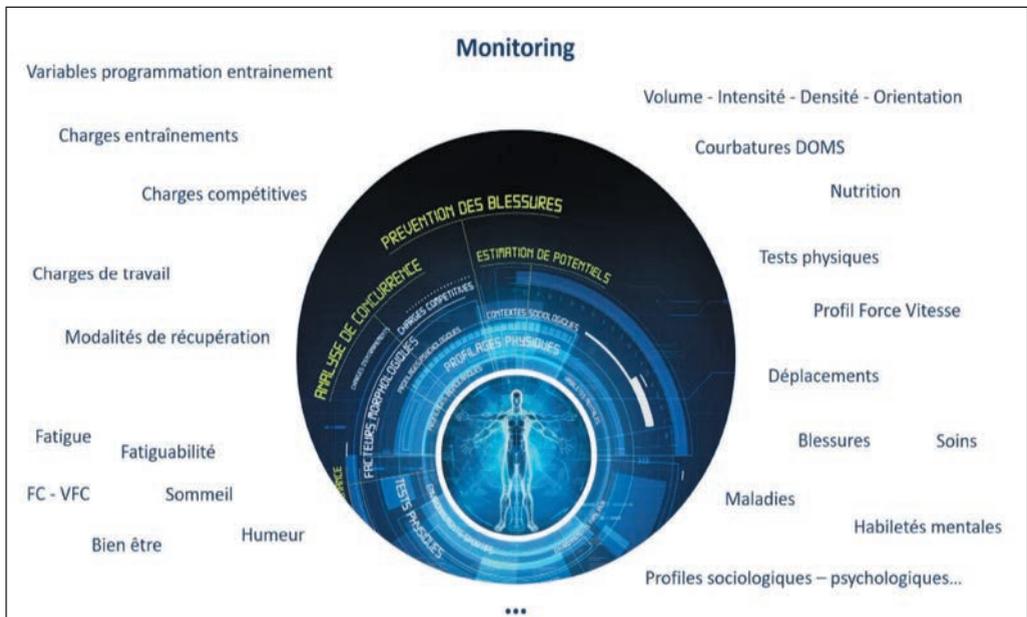


Figure 9

Applications du monitoring de données.

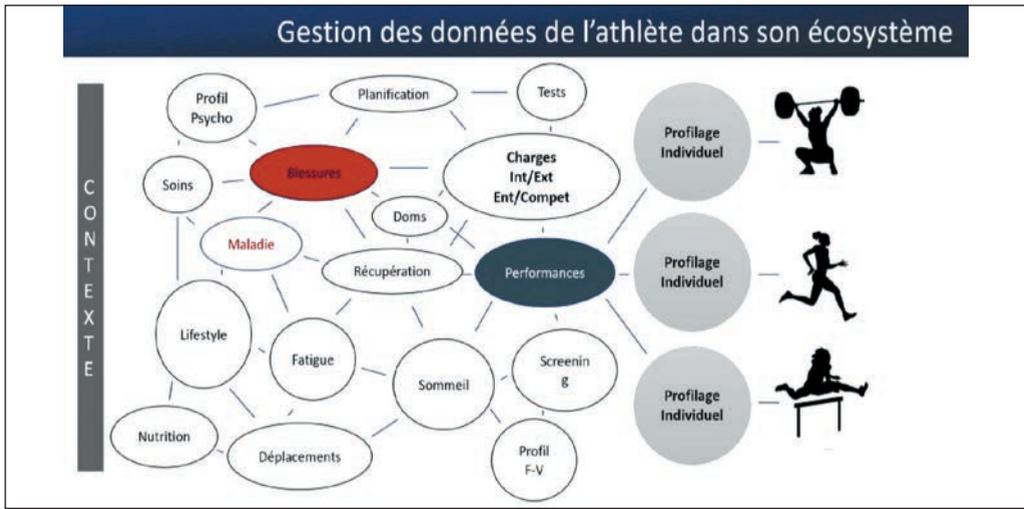


Figure 10

Nuage de notions pouvant affecter la performance de l'athlète.

blessures, la planification, des tests, autant de facteurs qui influencent les performances de l'athlète dans son écosystème.

La **Figure 10** présente tous les facteurs pouvant affecter la performance de l'athlète, mais les relations de ces facteurs entre eux ne sont pas identiques dans le temps. Ainsi, la fatigue dépend du type d'entraînement auquel on s'astreint selon le temps de sommeil. Pour tenter d'identifier ces relations qui sont individuelles et évolutives dans le temps, il faut capter des informations suffisamment pertinentes, mais qui peuvent se révéler intrusives, dès lors qu'on met des capteurs sur les matelas ou que l'on cherche des informations sur la situation familiale et sociale. Cela implique donc de fournir des explications aux athlètes et aux staffs.

La gestion des données sur l'athlète dans son écosystème n'est pas évidente, comme le montre l'exemple de la **Figure 11**.

Dans les deux cas, l'athlète s'est blessé, ce qui influe sur ses performances. En bas, la blessure est peut-être davantage en relation avec les charges d'entraînement ; la diminution du niveau de performance peut être liée à un sommeil impacté par des déplacements. En haut, elle est peut-être plus liée à ses capacités de récupération et à des charges d'entraînement qui étaient élevées, avec des niveaux de sommeil et de fatigue plus élevés qu'habituellement.

L'INSEP tente d'identifier les associations de facteurs qui prédisposent à des risques et d'établir des modèles de prédiction sur l'état de la forme de chaque athlète qui sont transmis aux décideurs.

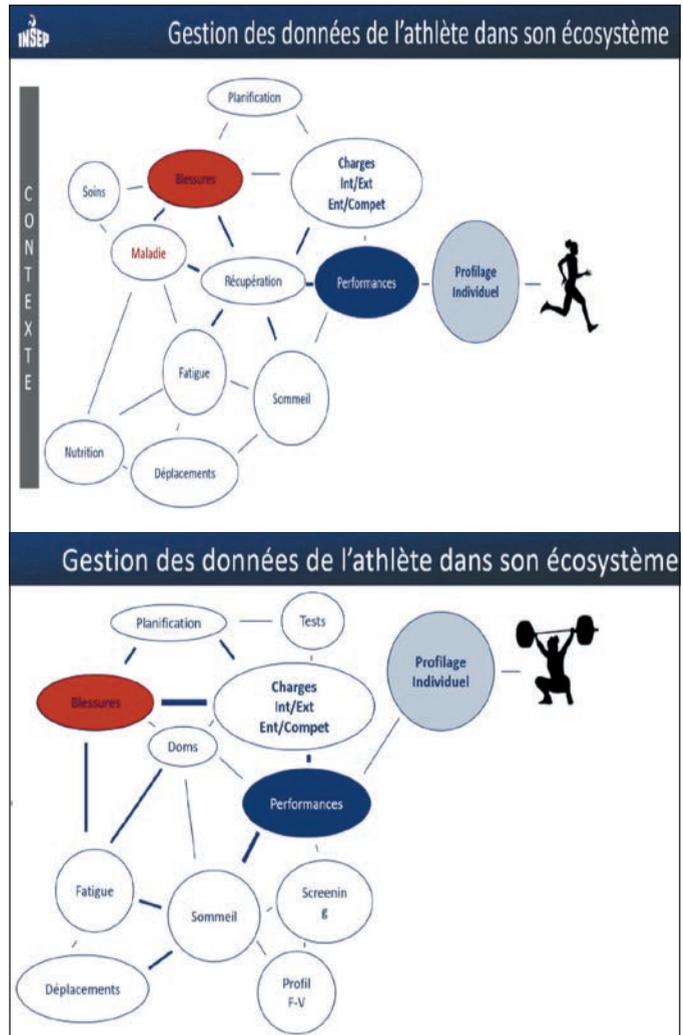


Figure 11

Les facteurs pouvant affecter la performance de l'athlète varient selon son écosystème.

Conclusion

La prédiction de performance aide les athlètes et leurs entraîneurs. Pour la mener à bien, le traitement d'une multitude de données issues de contenus déjà existants est nécessaire. Aujourd'hui, au lieu de mettre des capteurs, de faire venir les athlètes sur des plateformes de force dans les laboratoires, on capte l'information

en direct à partir d'une vidéo. L'INSEP travaille avec une dizaine de laboratoires de l'INRIA, spécialiste de l'image.

Par exemple, à partir de l'enregistrement d'une vidéo d'un match de boxe (**Figure 12**), on a la capacité de retracer et d'analyser toutes les données issues de l'ensemble des déplacements du boxeur rouge et du boxeur bleu. Cette pratique également usuelle pour d'autres sports permet de recueillir des informations sur les adversaires, mais aussi sur la quantification des charges d'entraînement, le but étant de recréer des profils force-vitesse *in situ* pour optimiser et individualiser les performances des athlètes.

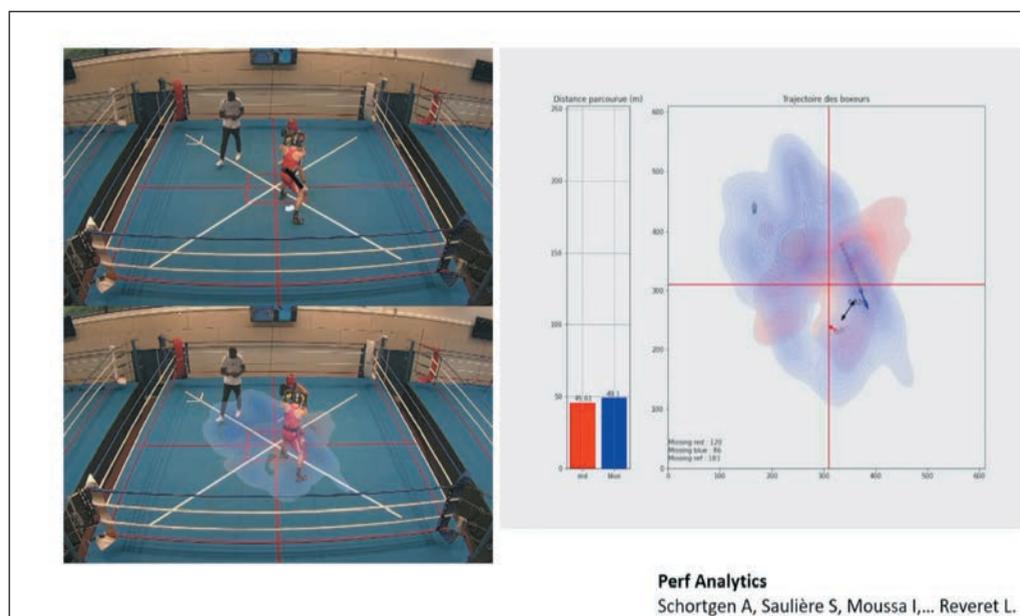


Figure 12

À gauche, image extraite d'une vidéo montrant l'acquisition de points issus du déplacement de 2 boxeurs.
À droite, cartographie de leurs déplacements.

Le rôle des matériaux composites dans les performances sportives

Yves Rémond est professeur émérite à l'Université de Strasbourg – École de Chimie, Polymères et Matériaux (ECPM), agrégé de mécanique. Il est spécialiste du comportement des matériaux structurants : les polymères, les matériaux composites, les biomatériaux, et de leurs applications dans le sport, que ce soit l'automobile, l'industrie aéronautique ou le spatial. Il a dirigé l'Institut de Mécanique des Fluides à Strasbourg et dirigé la mécanique des matériaux à la direction du CNRS à Paris. Il est membre du Haut Comité mécanique.

1 Les conditions nécessaires à la performance

À l'École de Chimie de Strasbourg, beaucoup d'élèves sont très sportifs. L'année dernière, Clara Bayol a été championne du monde de match racing¹ (**Figure 1**), une course entre deux bateaux identiques, un peu comme la Coupe de l'America².

La performance sportive nécessite des conditions que

tout le monde connaît, à commencer, naturellement, par un système musculosquelettique adapté à la pratique sportive visée (**Figure 2A**). Il faut ensuite acquérir un geste parfait au prix d'un entraînement important (**Figure 2B**). En fait, certains sports essaient d'éviter ces biais puisque si on pratique, par exemple, le judo, la lutte ou la boxe, il y a des catégories de poids qui font que, malgré des morphologies différentes, on peut quand même arriver à des performances importantes. On pourrait aussi imaginer qu'en hauteur on fasse des catégories de taille : quand on mesure 2 mètres de haut, on

1. Discipline de voile où seuls deux bateaux identiques s'affrontent directement.

2. Compétition de voile en match racing, nommée d'après la première course en 1851.



Figure 1

Clare Bayol, championne du monde 2023 de Match Racing.

ne saute pas la même hauteur que quand on mesure 1,60 m. Reste que la morphologie et le geste à acquérir ne sont pas les seules caractéristiques. Beaucoup de sports nécessitent un équipement supplémentaire, qui lui aussi devra posséder des propriétés particulières. La **Figure 2C** représente le champion coréen de tir à l'arc. Il est clair qu'il faut que son arc ait des capacités, des caractéristiques extrêmement performantes. On peut aussi citer le handisport : l'athlète peut avoir besoin

d'une prothèse de jambe et d'une lame de course³ en carbone. Évidemment, il faut que cette lame de course ait des propriétés totalement adaptées à l'athlète (**Figure 2D**).

2 Les équipements et leurs applications diverses pour les matériaux

On peut classer les différents équipements en cinq catégories (**Figure 3**). La première catégorie correspond aux équipements de protection, incluant notamment les casques. On peut se demander si un casque participe vraiment à la performance du sportif. En l'occurrence, on peut répondre par l'affirmative : si un sportif a besoin d'un maximum de légèreté, il a un intérêt à avoir un casque à la fois léger et protecteur. Cela participe à la performance de l'athlète. On peut raisonner de façon analogue pour les prolongements des membres, à savoir les skis, les raquettes, les perches. Ou

3. Équipement utilisé par les athlètes en situation de handicap pour la course.



Figure 2

Les facteurs de la performance sportive.

A. Le squelette et l'appareil musculaire. B. Le geste parfait : Anna Simic, record de saut en hauteur de 1,99 m en 2014. C. L'équipement : Lee Seung-Yun, champion du monde de tir à l'arc en 2013. D. Prothèse de handisport : lame de course en carbone pour enfant.

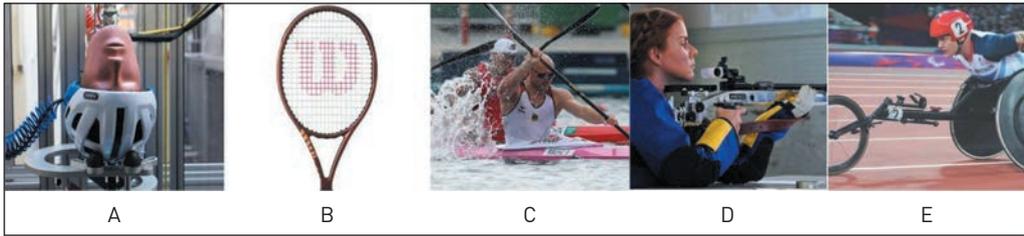


Figure 3

Les catégories d'équipement aident à :

A. La protection : essai de casque de protection ICube, Université de Strasbourg – CNRS. B. La performance : raquette de tennis (cadre et cordage). C. Le transport : Ronald Rauhe, course en ligne de kayak. D. Arme de précision pour tir sportif. E. Course en fauteuil.

encore pour les équipements de transport – tels un vélo, un bateau, une luge, etc. – ou pour les armes – arc, arbalète, pistolet, fusil. Et puis, bien sûr, on a aussi tous les éléments de suppléance pour le handisport.

Quelques remarques pour faire saisir la complexité de la qualification d'un matériel :

- Quand on teste **des casques**, on peut parfaitement prendre toute une série de casques, les tester de façon statique⁴, leur taper dessus pour tester la résistance puis les classer du meilleur au moins bon. Mais cela ne fonctionne pas bien. Pourquoi ? Parce que quand on refait ce test avec une tête artificielle, un crâne et un cerveau artificiel qui baigne dans le liquide céphalorachidien⁵, on s'aperçoit qu'on n'a pas du tout le même classement et qu'un casque qui n'était pas très bon quand il était vide peut devenir excellent quand il permet d'éviter des hématomes

sous-duraux⁶ : quand une petite veine en pont entre le sinus sagittal supérieur⁷ et le cerveau casse, on a un hématome sous-dural qui peut conduire au décès. Pour éviter cela, ce ne sont pas des casques vides qui doivent être testés.

- Sur la **Figure 3C**, on voit le champion allemand de **canoé**, bien connu aux Jeux Olympiques, utilisant une pagaie – ce n'est ni une rame ni un aviron – tel le prolongement de la main du sportif à l'eau (alors qu'une rame ou un aviron s'appuient sur le bateau), et les propriétés du bateau doivent être adaptées à cet usage.

- Concernant **le tir**, les conditions de l'environnement sont telles que les matériaux en jeu sont très critiques.

- Pour ce qui a trait aux éléments du **handisport**, retenons que quand on a un fauteuil de course, cela ressemble peu au

6. Accumulation de sang sous la membrane qui entoure le cerveau, souvent causée par un traumatisme crânien.

7. Canal veineux situé dans la partie supérieure du crâne, permettant le drainage sanguin du cerveau.

4. Branche de la mécanique étudiant les corps au repos ou en équilibre.

5. Fluide biologique entourant le cerveau et la moelle épinière.

fauteuil utilisé dans la rue pour les promenades. Là encore, il faut choisir des matériaux particulièrement adaptés.

3 Les propriétés des matériaux : quelle place pour les matériaux composites ?

3.1. Les propriétés attendues des matériaux pour les équipements sportifs

Essayons d'esquisser un cahier des charges à remplir par les matériaux pour sportifs, c'est-à-dire de lister les principales propriétés qu'ils devront posséder pour être qualifiés.

- Premièrement, on demande en premier lieu une **très grande rigidité** (capacité d'un matériau à se déformer peu sous un effort extérieur), ainsi qu'une certaine souplesse. On dira qu'on veut une « **rigidité pilotée** ».
- On attend une **résistance** (capacité à résister à des efforts extérieurs). Il peut s'agir d'une résistance à un effort statique, dynamique⁸, à une vibration, à une résistance au choc.
- On attend une **certaine durée de vie** : si on saute à la perche, on va sauter un certain nombre de fois, il va y avoir un certain nombre de chocs de la perche sur l'élément buteur⁹.

- On attend de la **légèreté**, parce que la plupart du temps ce sont des équipements qui ont un certain poids et qui devront être transportés par l'athlète.

- On attend enfin une **restitution d'énergie**, par exemple pour la raquette de tennis ou la perche.

En considérant ces différentes propriétés, on peut faire une remarque inattendue, à savoir que **les cahiers des charges ressemblent à ceux qui sont exigés par les fabricants des avions**. La **Figure 4** présente un avion Rafale¹⁰, un avion presque entièrement construit en matériaux composites, hormis sa motorisation. La similitude des cahiers des charges conduit à considérer les possibilités des matériaux composites pour les applications aux équipements sportifs comme celles qu'ils ont pour l'aéronautique.

3.2. Quelles propriétés pour quels matériaux ?

Pour progresser vers l'identification des matériaux performants pour les activités sportives, il convient d'aborder leurs nombreuses possibilités. Il faut en effet tenir compte d'une myriade de paramètres : le choix des matériaux, les compromis entre les propriétés diverses mentionnées plus haut (la résistance¹¹, la

8. Branche de la mécanique étudiant les mouvements et les forces en action.

9. Réceptacle en métal empêchant la base de la perche de glisser lors d'un saut.

10. Avion de combat polyvalent développé par Dassault Aviation en 1986.

11. Capacité d'un matériau à résister aux contraintes et aux charges appliquées.

rigidité¹² et la densité). À cela s'ajoutent des contraintes économiques, naturellement présentes partout. La complexité du problème est encore plus aiguë qu'il n'y paraît au premier regard, car des recherches se poursuivent dans les laboratoires et multiplient l'inventaire des possibilités à étudier.

Voici quelques exemples pour illustrer les choix auxquels sont confrontés les ingénieurs, et les changements de données qui peuvent survenir et parfois remettre en cause les premiers choix.

- Il faut noter la richesse originelle mais aussi l'**explosion récente du domaine des matériaux**. Il y a trois grandes classes de matériaux : les métaux, les polymères, les céramiques, hormis les matériaux naturels ou les biomatériaux. Ces classes correspondent à des dizaines, pour ne pas dire des centaines de matériaux différents qui intègrent différemment toutes les propriétés citées au paragraphe précédent (rigidité, résistance, durée de vie, légèreté, restitution d'énergie).

- Les choix faits pour parvenir aux solutions actuellement retenues pour les avions sont représentatifs de la démarche des ingénieurs. Prenons quelques exemples.

Question initiale : faut-il utiliser l'acier ou l'aluminium ? L'acier est deux fois plus rigide que l'aluminium et environ trois fois plus résistant. En revanche, il est trois fois plus lourd que

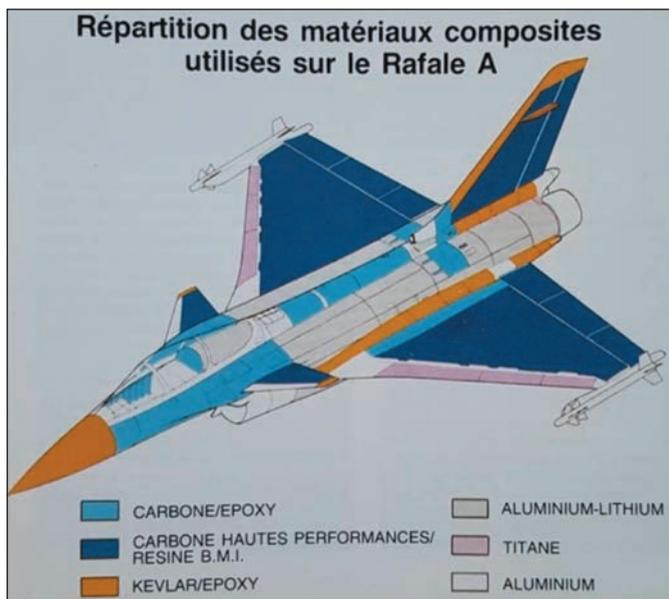


Figure 4

Matériaux composites utilisés sur le Rafale A.

l'aluminium. Par ailleurs, du fait des progrès techniques réalisés dans les années 1960, sa production industrielle était alors moins difficile et moins coûteuse. Le jeu des comparaisons et l'évolution de la situation technique due aux travaux des laboratoires à cette époque ont permis de fabriquer beaucoup d'avions en aluminium.

Dans la même période, se sont posées des questions sur les matériaux polymères. Regardons les polymères, et en particulier les polymères très utilisés dans les composites qui sont généralement des thermodurcissables¹³ : ils sont intéressants pour le domaine des matériaux

12. Propriété d'un matériau à conserver sa forme et à résister à la déformation.

13. Type de polymère qui se solidifie lorsqu'il est chauffé et ne fond pas lorsqu'il est chauffé à nouveau.

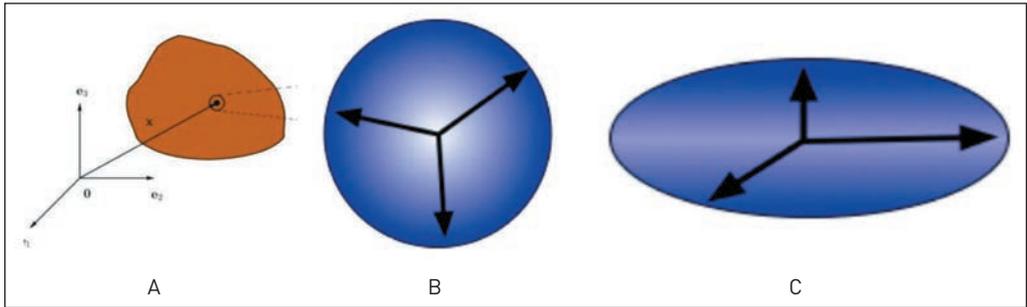


Figure 5

A. Objet 3D. B. Matériau isotrope. C. Matériau anisotrope.

composites, mais leur impact sur l'environnement est un point négatif. Par ailleurs, d'autres polymères n'ont pu être envisagés sur certains créneaux : ainsi, pour les époxy¹⁴ ou les polyesters¹⁵, la résistance aux contraintes est de l'ordre de 3 ou 4 GPa¹⁶ contre 200 GPa pour l'acier, ce qui les prive de certains usages. Les polymères sont des matériaux mous et donc peu résistants : leur résistance est aux alentours de 100 MPa contre 1000 MPa pour l'acier. En revanche, ce sont des matériaux légers avec une densité de l'ordre de 1, contre presque 8 pour l'acier. Ces domaines technologiques sont presque toujours le lieu d'arbitrages multiples.

14. Résine thermodurcissable utilisée comme adhésif, revêtement ou matériau composite.

15. Polymère synthétique souvent utilisé dans la fabrication de fibres et de plastiques.

16. Gigapascal, unité de mesure de la contrainte ou de la résistance des matériaux.

3.3. Une exigence du sport : l'anisotropie des propriétés mécaniques

Se pose aussi la question de l'anisotropie. Si vous prenez un point quelconque dans un matériau quelconque (Figure 5A), et si autour de ce point vous portez l'intensité d'une propriété, dans toutes les directions et si la figure que vous obtenez est une sphère, c'est que le matériau est isotrope – cette propriété sera la même dans toutes les directions (Figure 5B). Mais cela n'intéresse pas du tout le sportif d'avoir, par exemple, une perche très résistante dans son épaisseur ! Ce qu'il veut, c'est qu'elle soit élastique dans la longueur. En réalité, un équipement sportif ne doit avoir des propriétés performantes que là où c'est nécessaire. **Ce n'est pas l'isotropie qu'il faut demander aux matériaux mais l'anisotropie**¹⁷ (Figure 5C).

C'est une des principales raisons de l'intérêt des **matériaux composites** pour les

17. Propriété d'un matériau dont les propriétés varient selon la direction.

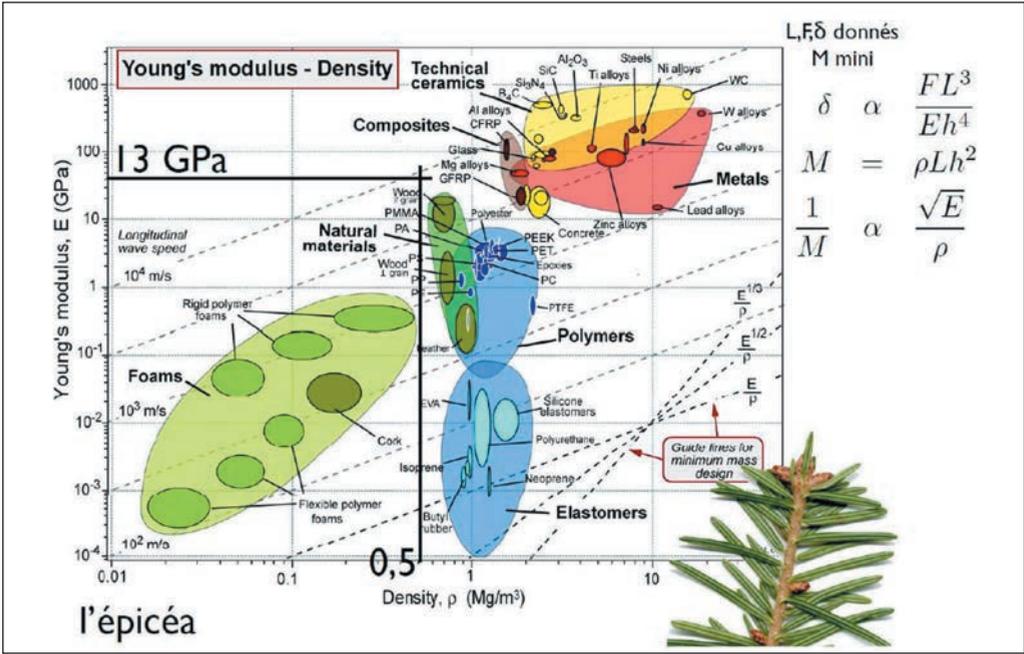


Figure 6

Diagramme d'Ashby, qui relie densité et rigidité avec une échelle log-log¹⁸.

équipements sportifs, car ils sont particulièrement bien adaptés à des propriétés anisotropes. Un matériau composite, c'est une association de fibres, principalement de verre et de carbone, avec une colle qui est un polymère, souvent époxy ou polyester. Comme ces fibres vont pouvoir être orientées exactement dans les directions où on en a besoin, on obtient un matériau anisotrope sur mesure, et le « sur-mesure » est une dimension clé de l'optimisation que l'on recherche pour la performance sportive.

3.4. Classification des matériaux selon leurs propriétés

Je présente le diagramme de la **Figure 6** bien qu'il soit un peu technique parce qu'il est très classique dans la profession. Imaginez que vous avez affaire à une étagère avec des rayonnages pour ranger tous les matériaux connus en les classant selon les principales propriétés. Vous mettez à gauche les matériaux les plus légers et à droite les matériaux les plus lourds, en bas les matériaux les plus mous et en haut les matériaux les plus rigides, etc. Le résultat ? En haut à droite figurent les matériaux les plus lourds et les plus rigides : on retrouve **les métaux et les**

18. Représentation graphique où les deux axes sont des échelles logarithmiques.

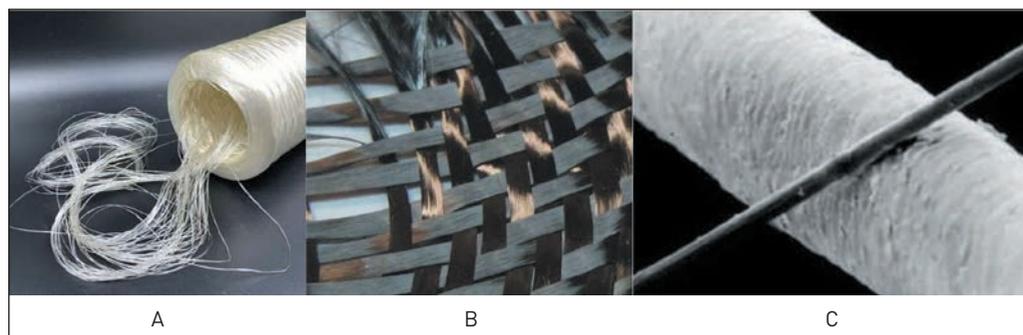


Figure 7

A. Filament de fibres de verre. B. Mèches de fibres de carbone. C. Comparaison des diamètres d'un cheveu et d'une fibre de carbone : ce dernier est plus de dix fois plus fin.

céramiques¹⁹ dans la zone vert clair, vous avez **les mousses, mousse de polyuréthane**²⁰, **mousses variées**, des matériaux **extrêmement légers**. Dans la zone bleue du bas, on a **les caoutchoucs, les élastomères**²¹, et dans la zone bleue du haut, **les polymères**. On retrouve aussi les matériaux naturels variés, comme le bois, et enfin **les matériaux composites**.

Les matériaux composites sont très haut placés : ils sont très rigides et plus lourds que les polymères et les élastomères, mais bien plus légers que les métaux. **Parmi les matériaux très rigides et légers, les matériaux composites sont les matériaux mieux placés** parmi l'ensemble des matériaux qui existent.

19. Matériau non métallique composé d'oxydes métalliques, souvent dur et résistant à la chaleur.

20. Polymère utilisé dans la mousse et les revêtements pour sa résilience et sa durabilité.

21. Polymères ayant des propriétés élastiques, tels que le caoutchouc.

3.5. Les fibres : une place à part dans les matériaux

Il existe une grande variété de fibres. Nous considérerons ici les **fibres de carbone**²² et les **fibres de verre**²³. Comparons-les aux métaux et aux polymères.

La fibre de verre a une rigidité identique à celle de l'aluminium, 70 GPa, mais une résistance de 4500 MPa contre 300 à 400 MPa pour l'aluminium, soit dix fois plus résistante.

La fibre de carbone a une rigidité au minimum équivalente à celle de l'acier, 200 GPa, mais on peut aller jusqu'à 700-800 GPa voire davantage. Concernant sa résistance, l'acier était à 1000 MPa – 1500 pour certains aciers très spéciaux. On peut aller jusqu'à 7000 MPa avec le carbone.

22. Fils de carbone très fins issus de la combustion intense de polymères et réputés pour leur résistance.

23. Verre fondu en fils très fins, offrant une bonne résistance à la traction et à la flexion.

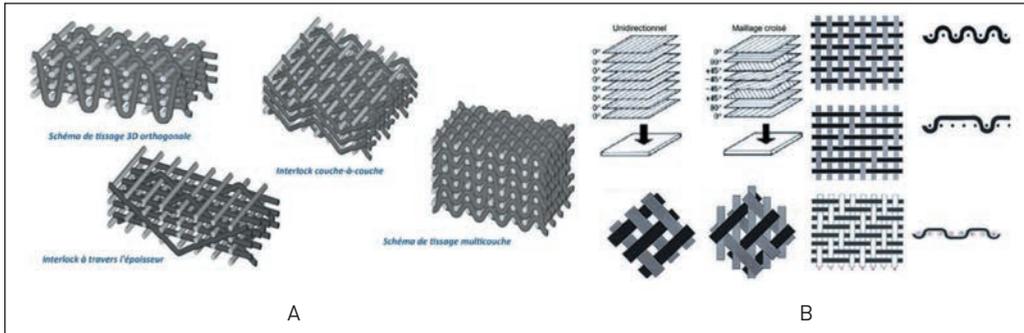


Figure 8

Schémas de conditionnement des fibres.

A. Tissage tridimensionnel. B. Constitution d'un stratifié.

Il est clair que les fibres de verre ou les fibres de carbone sont des matériaux extrêmement performants. La **Figure 7A** reproduit un filament constitué de centaines de fibres de verre. Sur la **Figure 7B**, ce sont des mèches de fibres de carbone : il y a des milliers de fibres de carbone dans ces mèches. La **Figure 7C** illustre une fibre de carbone devant un cheveu : le diamètre d'un cheveu est de 70 microns environ ; celui d'une fibre de carbone mesure entre 5 et 10 microns.

Pour utiliser les fibres, on les conditionne dans de la colle puis on les empile dans de nombreuses directions différentes : on peut les tisser, les tricoter, même en trois dimensions pour faire des objets massifs (**Figure 8A**). Les possibilités sont très nombreuses. On peut en particulier les conditionner comme des stratifiés (**Figure 8B**). Ce sont des plaques ou des morceaux de coque avec des courbures qui ont quelques millimètres d'épaisseur.

Telles sont les **extraordinaires possibilités des matériaux composites**. Ils constituent des matériaux «à la carte» et pour du «sur-mesure». Ils permettent de placer les propriétés physiques à l'endroit et dans la direction où l'on en a besoin. De plus, ils ne présentent pas de corrosion mais ont une bonne résistance à la fatigue²⁴. **Les matériaux composites sont remarquablement bien adaptés pour des utilisations dans l'aérospatiale, l'aéronautique et les équipements sportifs de compétition.**

4 Exemples d'applications pour les matériaux composites dans le sport

4.1. La raquette de tennis

L'étude de la raquette de tennis pour son optimisation commence, pour le physicien, par un petit calcul d'éléments

24. Capacité d'un matériau à résister à une défaillance due à des charges répétées.

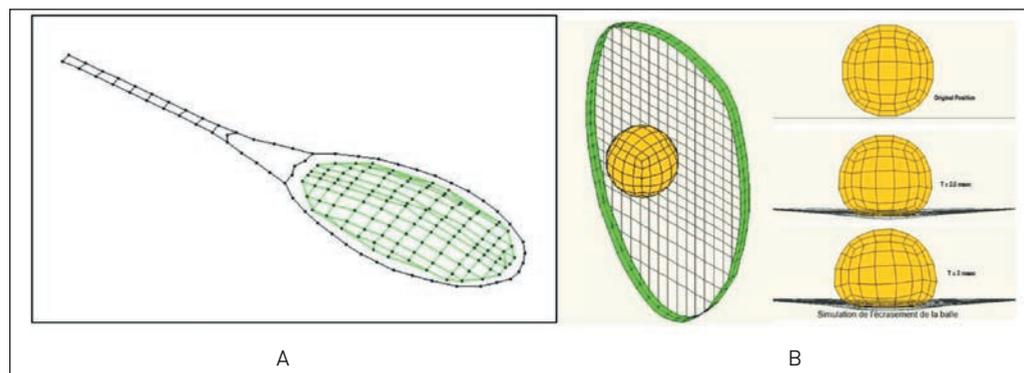


Figure 9

A. Vibration du tamis par simulation numérique. B. Simulation de l'écrasement de la balle par calcul d'éléments finis.

finis²⁵ devenu très rapide avec un ordinateur classique. Le résultat montre que, quand on tape dans une balle avec une raquette, celle-ci vibre de tous les côtés : le tamis²⁶ et le support du tamis vibrent partout (Figure 9A). On voit que la balle s'écrase complètement, change de volume, etc. (Figures 9B et 9C) : toute la physique particulière du choc de la balle est visible sur une raquette.

Au moins quatre points particuliers du tamis sont intéressants et doivent être pris en compte pour bien comprendre le fonctionnement de la raquette : le centre de percussion, le centre d'inertie, le centre de surface et le nœud de vibration (Figure 10A).

Une petite expérience absolument élémentaire permet de définir le **centre de percussion**. Vous prenez une raquette

et vous attachez au manche un petit fil. Par le manche, vous la laissez pendre, et puis vous lancez une balle horizontalement sur le tamis (Figure 10B). La raquette peut évidemment se désaxer autour du point d'attache, *via* le centre de rotation. Ici, celui-ci est en dehors de la raquette, mais si vous lancez la balle à un autre endroit du tamis (le centre de percussion), il peut être sur le manche de la raquette. Si tel est le cas, cela veut dire qu'au moment où le joueur tape la balle, il va y avoir – pour peu qu'on fasse coïncider ce centre de percussion avec l'axe de rotation du poignet – juste un mouvement de rotation du poignet qui sera aisément encaissé par la musculature. Sinon, on a un déplacement latéral qui entraîne le *tennis elbow*²⁷ et des souffrances physiques pour l'athlète.

25. Méthode numérique utilisée en calculs d'ingénierie qui divise un domaine en éléments plus petits.

26. Partie de la raquette de tennis avec des cordes, utilisée pour frapper la balle.

27. Blessure causée par une sur-utilisation des muscles de l'avant-bras, commune chez les joueurs de tennis.

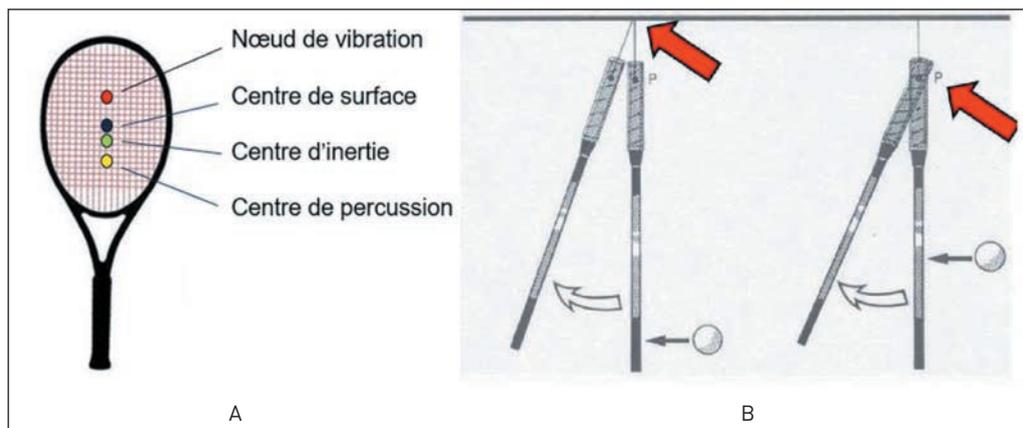


Figure 10

A. Points particuliers d'une raquette de tennis. B. Centre de rotation et centre de percussion.

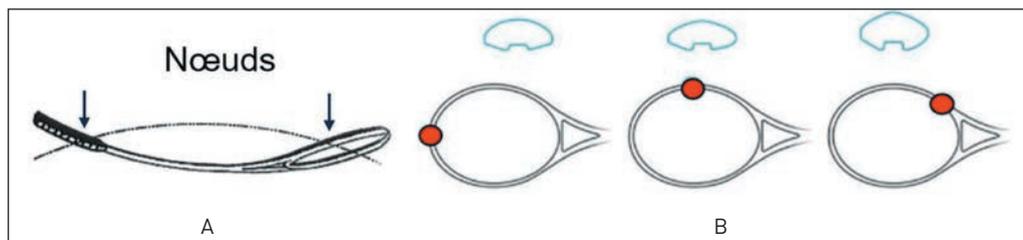


Figure 11

A. Nœuds de vibration. B. Sections inhomogènes du cadre.

Qu'est-ce que le **nœud de vibration**²⁸ (Figure 11A) ? Quand on tape sur une raquette de tennis, celle-ci entre en vibration. Le premier mode de vibration est une vibration de flexion. Deux points ne vont pas vibrer : l'un est sur le manche, l'autre sur le tamis. Si la balle tape sur ce nœud de vibration, aucune vibration de la structure n'est induite. En revanche, si elle tape à côté, des vibrations vont démarrer avec de

28. Point fixe sur une corde vibrante où l'amplitude de vibration est nulle.

nombreux modes, mais c'est le mode premier qui sera le mode principal. On doit donc chercher à ce que ce nœud de vibration soit précisément situé par rapport à l'endroit où le joueur va taper la balle. Ce joueur doit être très bon, car il doit savoir exactement où il va taper la balle sur la raquette. On a également intérêt à ce que ce nœud sur le manche soit aussi proche que possible du poignet du joueur pour, là encore, éviter les douleurs avec un déplacement anormal.

Voyons ensuite le **centre de surface** et le **centre d'inertie**.

Le centre de surface est identique au centre d'inertie si le cadre est entièrement homogène, avec la même géométrie et la même masse partout. Comme ce n'est pas le cas (**Figure 11B**), on a une différence entre le centre de masse et le centre d'inertie, mais on a intérêt à ce que ces points soient le plus proche possible de l'intérieur du tamis pour optimiser les choses. Cela demande néanmoins un joueur très aguerri parce que cela veut dire que s'il tape à côté, il peut se passer n'importe quoi. Les exigences concernant les propriétés de la raquette peuvent être formulées ainsi : on veut une certaine puissance et, pour un athlète confirmé, la **puissance** la plus importante. On veut un contrôle, c'est-à-dire la **précision** des trajectoires. On veut aussi – nouvelle notion – la **récupération des coups ratés**. Un coup raté, c'est un coup dans lequel la balle va taper le tamis en dehors de son axe. Une torsion de la raquette est alors provoquée. Et si l'on n'a pas prévu d'introduire des fibres pour résister à cette torsion, **le coup est raté**. Si vous mettez des fibres capables de résister à la torsion, vous en mettez donc moins qui seront capables de résister à la flexion, et la raquette sera moins performante. Comme d'habitude, il s'agit d'une compétition, d'un compromis entre les différentes propriétés, selon que l'on est un athlète débutant ou un athlète très confirmé.

La **rigidité** en même temps que la puissance, c'est beaucoup de rigidité en flexion et un moment d'inertie très élevé, ce que les joueurs appellent le

« *swing weight*²⁹ ». La précision des trajectoires va dépendre aussi de la tension du tamis, quand la récupération des coups ratés dépend de la rigidité en torsion. C'est pour cela que l'on voit de grands champions à qui il arrive de rater des coups : avec un coup qui a l'air facile, si la balle tape un peu à côté de l'endroit où il pensait devoir taper au centre de la raquette, le coup est raté. Cela est dû aux raquettes optimisées pour la restitution d'énergie en flexion, négligeant complètement la torsion. Et ce alors qu'un débutant dira : « Mais moi je les rattrape ces coups, même en tapant sur le bois », comme on disait autrefois, quand les raquettes étaient en bois.

On veut aussi la **facilité de changer de geste**, qui demande d'avoir un **moment d'inertie**³⁰ **faible**. Cela est important quand on est au filet, où le moment d'inertie doit être le plus faible possible. À vrai dire, ce n'est pas tout à fait compatible avec la puissance qui réclame au contraire un moment d'inertie élevé.

Comment fabrique-t-on la raquette par compromis entre toutes les exigences mentionnées ? En fait, cela se traduit dans la **conception et la fabrication des matériaux d'une façon très simple** (**Figure 12A**). Si la raquette est verticale et si vous mettez des fibres dans la direction de la raquette dans le manche, vous augmentez

29. Inertie résultant de la distribution du poids d'une raquette de tennis qui affecte la maniabilité.

30. Mesure de la résistance d'un objet à changer de rotation, dépendant de sa masse et de sa distribution.

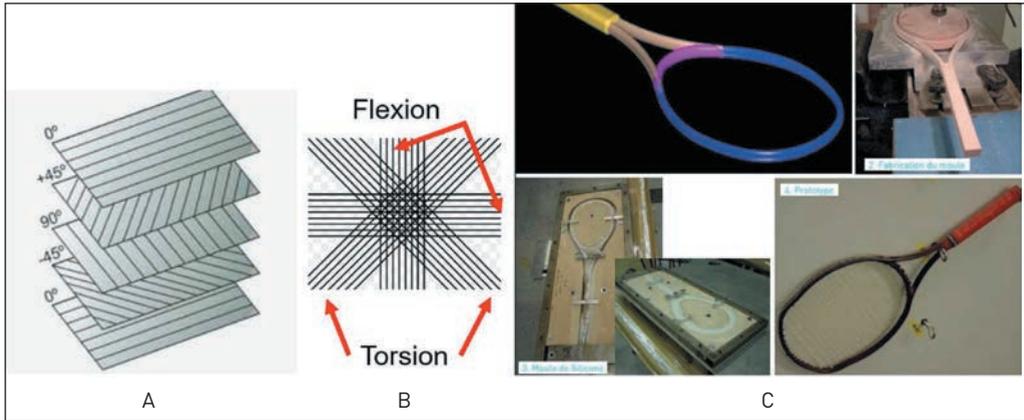


Figure 12

La raquette de tennis.

A. Conception et orientation des fibres du cadre. B. Fibres en flexion et en torsion. C. Simulation numérique et fabrication d'une raquette.

la résistance à la flexion. En revanche, si vous mettez des fibres inclinées à plus ou moins 45° (Figure 12B), vous mettez de la rigidité en torsion, mais si vous avez un stock de fibres à placer, plus vous en mettez en flexion, moins vous en avez en torsion, etc.

Avec mon collègue Jean-François Carron, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, les élèves ont calculé, en fonction de leur morphologie, de leur géométrie, la meilleure raquette possible pour eux par simulation numérique. Ils ont fabriqué et obtenu le moule en silicone³¹ (Figure 12C) dans lequel ils avaient mis les fibres. Ils sont tous repartis avec une raquette de tennis personnalisée.

4.2. La perche

La perche est intéressante parce que c'est un sport dans lequel les matériaux utilisés ont beaucoup varié depuis l'origine (Figure 13). Au début du xx^e siècle, on faisait des perches en bois, ensuite des perches en bambou qui étaient creuses, avec une souplesse un peu plus grande, puis on s'est mis à faire des perches en aluminium. C'est seulement dans les années 1960 que l'on a utilisé des perches en fibre de verre avec un petit peu de fibre de carbone.

L'évolution du record du monde du saut à la perche en fonction du matériau utilisé est spectaculaire (Figure 14). Jusqu'en 1900, avec les perches en bois, on atteignait péniblement 3,50 m. Avec les perches en bambou, cela a augmenté jusqu'à la Seconde Guerre mondiale où on arrivait à 4,50 m. L'apparition des perches en aluminium n'a absolument rien changé : vous

31. Polymère souvent utilisé dans les moules pour ses propriétés d'étanchéité et de flexibilité.

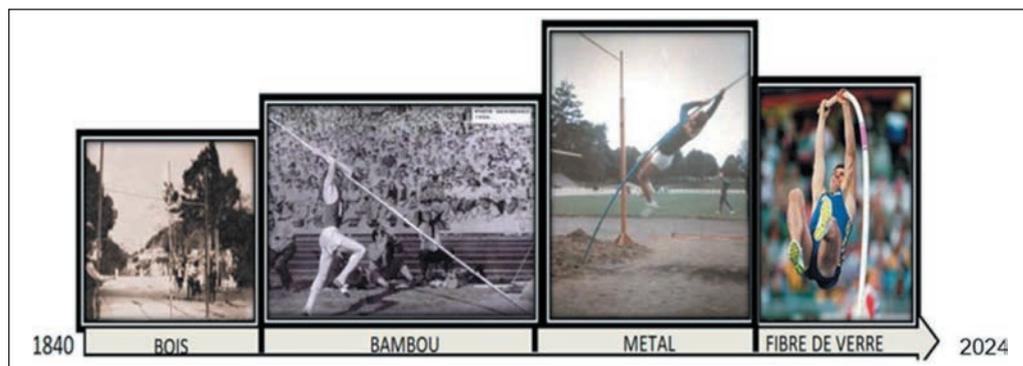


Figure 13

Évolution des matériaux utilisés dans les perches.

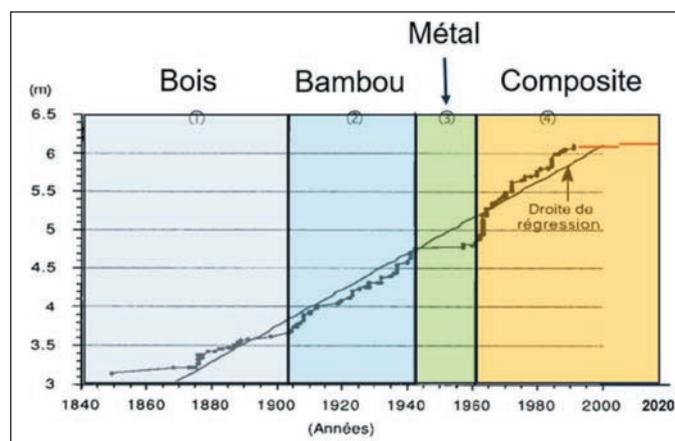


Figure 14

Évolution du record du saut à la perche en fonction du matériau utilisé.

voyez que le record du monde a totalement stagné, la perche en aluminium n'apportait rien. C'était un matériau qui était utilisé en aéronautique.

À partir des **années 1960 sont arrivées les perches en fibre de verre**, d'une très grande souplesse et avec une grande restitution d'énergie, exactement ce qu'il fallait pour l'athlète. Instantanément, le record a bondi jusqu'aux

années 1990 avec Bubka³². Maintenant, on a un Français qui est champion du monde³³, mais c'est à 1 cm près, et le record du monde n'a pas réellement bougé depuis 25 ans. On n'est en théorie pas très loin du plafond.

Comment sont faites ces perches d'aujourd'hui ? Vous avez des fibres de carbone qui sont dans la direction de la perche – on ne peut pas en mettre trop, sinon la perche serait trop rigide – et on complète la perche avec des tissus de verre qui vont renforcer sa capacité à résister aux chocs – notamment en arrivant sur le butoir – et à épaissir l'ensemble de la perche. Ainsi, on a des perches qui sont extrêmement performantes (Figure 15).

32. Ancien champion ukrainien de saut à la perche, célèbre pour avoir établi le record de 6,15 m en 1985, record qui restera invaincu durant 21 ans avant d'être battu par Renaud Lavillenie avec 6,16 m en 2014.

33. L'actuel titulaire du record du monde de saut à la perche masculin est Armand Duplantis (Suède) avec un saut à 6,26 m établi à Chorzow (Pologne) en août 2024.

4.3. Le snowboard

Troisième exemple, les snowboards. A priori, c'est simple : c'est une planche qui a un peu une forme de 8, mais où on va retrouver exactement les mêmes problèmes que sur la raquette de tennis, à savoir qu'un snowboard doit résister à la flexion mais aussi à la torsion, notamment dans les virages ou dans les tubes³⁴ (Figure 16).

Une question générique pour qui veut améliorer un équipement sportif : « Peut-on le faire sans changer de matériaux ni changer la quantité de matière utilisée ? » A priori, ce n'est pas très facile, mais la fabrication des snowboards démontre que c'est possible. En effet, il faut agir sur la géométrie. La technique consiste à **faire appel aux matériaux dits « sandwich »**, qui permettent de contrôler la géométrie et grâce auxquels des gains de performance spectaculaires ont été obtenus dans plusieurs disciplines.

Qu'est-ce qu'un matériau sandwich ? C'est une version des matériaux composites. Typiquement, on part de deux plaques composites entre lesquelles on va introduire un matériau passif, sans propriété particulière. Il n'a aucune propriété mécanique. Cela peut être une mousse, du balsa³⁵, du nid d'abeille³⁶,

34. Piste en forme de U utilisée pour réaliser différentes figures en snowboard ou en ski.

35. Bois léger souvent utilisé dans la construction de modèles réduits et d'artisanat.

36. Structure hexagonale utilisée pour sa légèreté et sa résistance dans les matériaux composites.

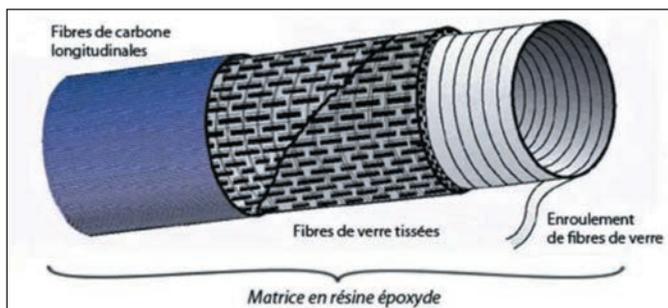


Figure 15

Structure des perches en composite.

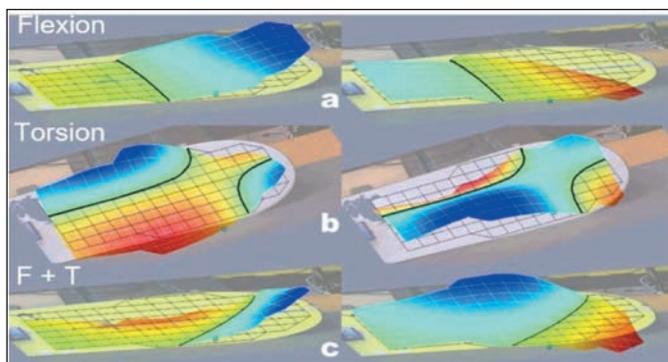


Figure 16

Contraintes en flexion et en torsion sur le snowboard.

etc. Son rôle est simplement de séparer les deux plaques. Sur la Figure 17A sont représentées deux plaques formant une épaisseur totale égale à t qui sont collées sans être séparées. On pose la rigidité, la résistance et la masse à la valeur de 1. Maintenant, on les sépare avec une mousse ou un nid d'abeille : en passant de t à $2t$, on a doublé l'épaisseur mais on a **multiplié par 7 la rigidité en flexion simplement en les écartant l'une de l'autre**.

Si on multiplie par 4 l'épaisseur, on multiplie la rigidité

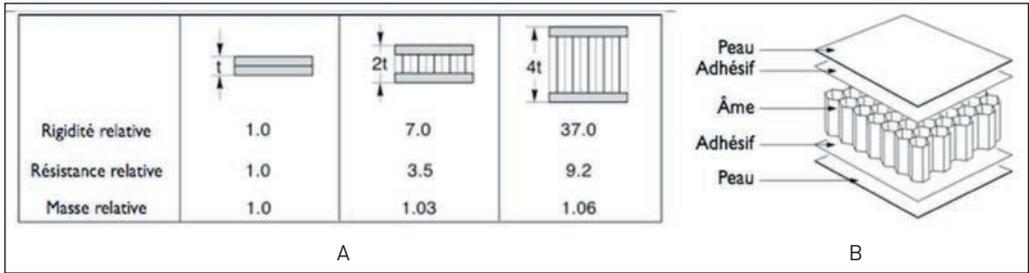


Figure 17

A. Variation des propriétés d'un matériau sandwich en fonction de l'écartement. B. Structure d'un matériau sandwich.

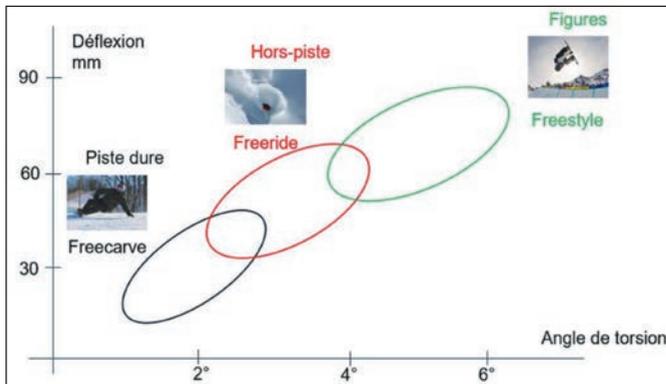


Figure 18

Rigidité en flexion et en torsion pour les trois activités en snowboard.

par 37, c'est gigantesque : on peut augmenter fortement la résistance en flexion alors que la masse n'a quasiment pas bougé.

En s'adaptant à une géométrie particulière, on peut donc changer considérablement les propriétés des équipements sportifs par l'introduction de matériaux sandwich avec des peaux en matériaux composites (Figure 17B).

Dernière information concernant les snowboards. Il y a trois types d'activité en snowboard (Figure 18). Le freecarve

consiste à utiliser une planche pour être sur une piste dure et avoir des virages serrés – faire du slalom par exemple sur une piste damée –, là il faut des planches qui sont très rigides à la fois en flexion et en torsion. Figure 18, à gauche, on voit la rigidité en flexion : plus on est haut, plus la rigidité est faible. Figure 18, en bas, la rigidité en torsion : plus l'angle est important, plus la rigidité en torsion est faible. Quand on est en freeride, c'est-à-dire le hors-piste, on a besoin d'avoir une souplesse plus importante que quand on est sur une piste damée : les planches freeride qui sont fabriquées sont à l'intérieur de cette ellipse (Figure 18, au milieu). Pour le freestyle – des figures dans le tube qu'on voit parfois à la télévision –, on a besoin d'avoir des planches très souples parce que les angles au bord du tube sont très importants, mais il ne faut pas que cela empêche la vitesse de l'athlète : les planches adaptées sont particulièrement flexibles à la fois en flexion et en torsion. Voilà qui illustre la diversité des choix techniques à considérer.

4.4. L'aviron

Autre exemple ici avec une tranche de coque d'aviron³⁷ (**Figure 19**). Les pagaies sont fabriquées principalement en **fibre de carbone avec interpositions de nids d'abeille** : ce sont des matériaux sandwich particulièrement résistants avec une rigidité extrêmement forte nécessaire car l'objet est très long.

Le matériau est principalement la fibre de carbone en tissu ou bien unidirectionnel avec, en interposition, des nids d'abeille ou des mousses variées.

Pour la planche de surf, le problème est un peu différent. Pour que l'utilisateur puisse bénéficier de la force d'Archimède³⁸, il faut que la planche ait du volume pour que l'athlète dessus ne prenne pas l'eau. La planche de surf comprend une âme³⁹ en polystyrène très volumineuse (**Figure 20**). Il suffit de mettre très peu de fibres pour obtenir une rigidité très importante.

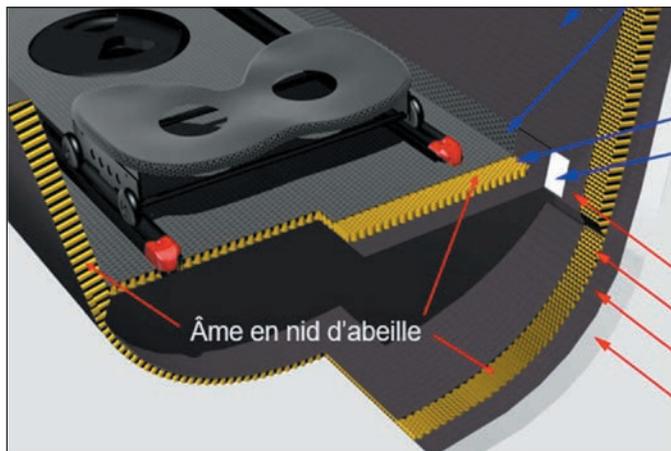


Figure 19

Tranche d'une coque d'aviron.

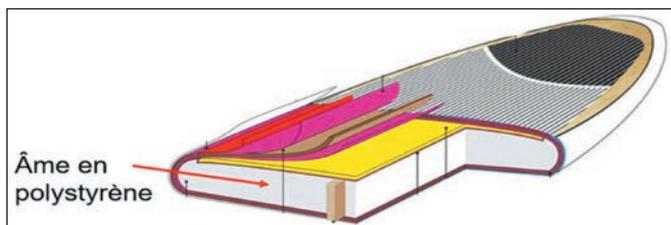


Figure 20

Structure d'une planche de surf avec son âme en polystyrène.

4.5. La lame de course pour le handisport

Sur la **Figure 21A**, on a des équipements de prothèses en carbone à gauche avec ici des coureuses qui ont une seule prothèse. Sur la **Figure 21B** est représenté un coureur avec

deux prothèses ; contre-intuitivement, cette situation est un peu plus favorable techniquement, parce que la symétrie de la course favorise cette géométrie avec deux prothèses au lieu d'une prothèse d'un côté, un membre valide de l'autre...

On peut apprécier cette comparaison sur la **Figure 22**. La courbe en rouge est celle d'un athlète handicapé et son battement a une fréquence plus grande que celui de l'athlète valide. En effet, dans un membre amputé au niveau du genou, le moment d'inertie est plus faible avec la même

37. Sport nautique où les athlètes propulsent un bateau long et fin à l'aide de pagaies.

38. Force ascensionnelle exercée par un fluide sur un objet immergé, égale au poids du fluide déplacé.

39. Structure centrale d'une planche de surf, souvent faite de mousse, qui lui confère sa flottabilité et sa rigidité.

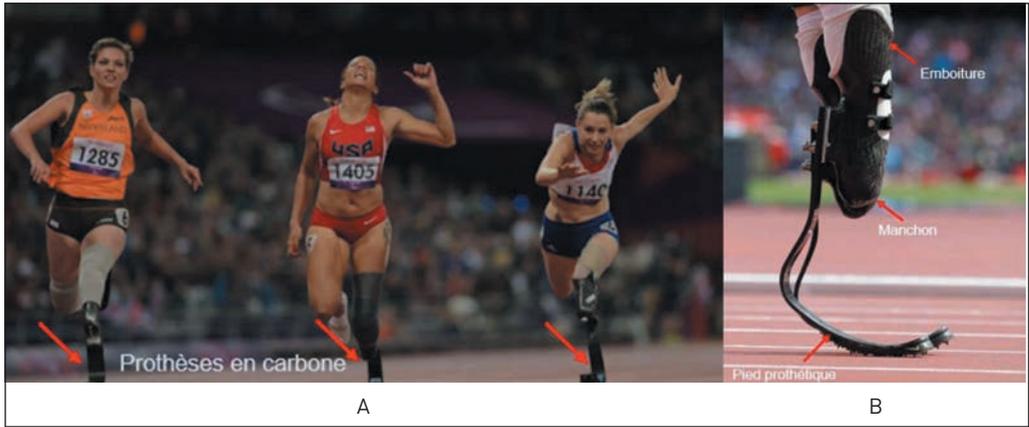


Figure 21

A. Athlètes unijambistes avec des prothèses en carbone. B. Athlète avec deux prothèses.

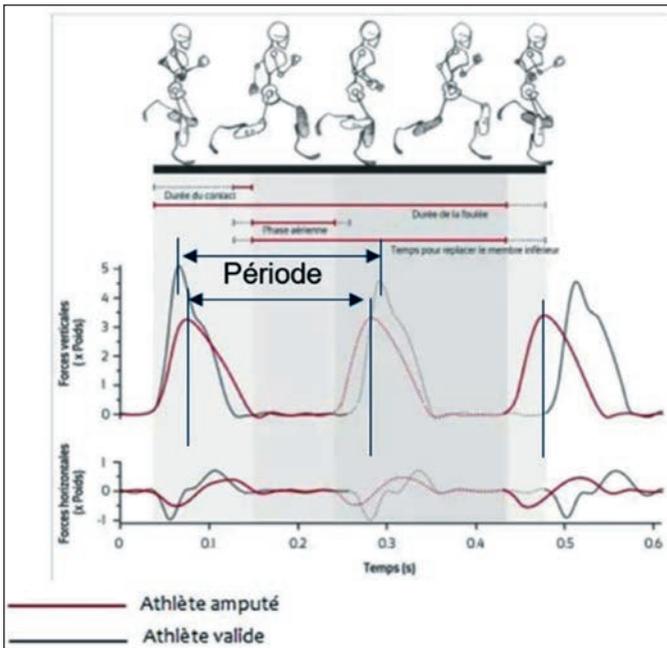


Figure 22

Comparaison de la fréquence de battement et de la force appliquée d'un athlète valide et d'un athlète amputé.

musculature de la cuisse. Il va donc prendre un peu moins de temps pour ramener la jambe en arrière : la fréquence de battement est 20 % supérieure environ.

On constate aussi – avec la force exercée sur le sol en rouge – que la force exercée sur le sol de l'athlète handicapé est moins importante et dure plus longtemps que celle de l'athlète valide. Pourquoi ? Comme il n'y a pas les muscles de rebond du mollet et du pied, on a uniquement de la restitution de l'énergie de déformation de flexion, **le temps d'appui sur le sol de l'athlète handicapé est donc plus long**. Toutes ces caractéristiques font que quand on a une prothèse d'un côté et une jambe valide de l'autre, ce n'est pas du tout facile de gérer tout cela.

À la question : « Est-ce qu'il y en a un qui est plus avantage que l'autre ? », il y a eu beaucoup d'études là-dessus et on ne sait pas très bien répondre. En moyenne, quand



Figure 23

A. Fauteuil de course. B. Fauteuil de basket.

même, il semble plus facile pour les athlètes valides de faire des performances avec quelquefois des nuances, comme par exemple sur 200 ou 400 mètres. On avait un athlète sud-africain – je ne veux pas citer son nom parce qu’il a fait beaucoup de dégâts par la suite⁴⁰ –, qui faisait des fins de course extrêmement rapides. Pour la fin de course, quand on a une prothèse en carbone avec une lame en carbone, la lame en carbone n’est pas fatiguée, alors que le mollet et le pied de l’athlète valide commencent à être saturés en acide⁴¹ : **les fins de course des athlètes avec une lame sont plus performantes que celles des athlètes valides**. Pour les débuts de course, ce n’est pas tout à fait la même chose

et je pense que c’est un peu illusoire de vouloir catégoriser tout cela.

4.6. Le fauteuil

Comme dernier exemple, regardons les chaises : il y en a de toutes sortes. On voit qu’il n’y a rien de commun entre une chaise de course, un fauteuil de course (**Figure 23A**) et un fauteuil pour le basket (**Figure 23B**) – c’est encore différent pour les fauteuils pour l’escrime, qui sont fixés au sol avec une distance fixe entre les deux escrimeurs. On joue alors sur la souplesse. On voit aussi des fauteuils en aluminium, **d’autres qui sont entièrement en carbone, très optimisés**, y compris pour la résistance à l’air.

40. Oscar Pistorius, athlète sud-africain et recordman du monde du 100 m handisport en 2007, reconnu coupable du meurtre de sa compagne Reeva Steenkamp en 2017.

41. Acide lactique, produit métabolique résultant de l’exercice intense, contribuant à la fatigue musculaire.

Conclusion

Il est essentiel de se souvenir des points suivants :

1. Il y a toujours un travail infini pour améliorer les matériaux pour le sport
2. Les matériaux composites sont un miracle. Leurs propriétés, leur diversité, les perspectives qu'ils ouvrent sont porteuses de progrès spectaculaires. Ceci est vrai dans tous les domaines, et en particulier pour les équipements des sportifs de haut niveau et des sportifs handicapés.

Quel doit être le rôle d'un vêtement de sport ?

*Marie-Ange Bueno, Professeure, et Brigitte Camillieri, Maître de Conférences à l'ENSISA et au Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles – Université de Haute-Alsace-Mulhouse.
René Rossi, Professeur à l'Empa – Saint Gallen (Suisse).*

Introduction

Ce chapitre s'adresse à tout sportif ou sportive, car toutes les problématiques, même de base, ne sont pas réglées.

Considérons le sportif amateur, lors d'un exercice physique : il contracte ses muscles et produit de la chaleur ; sa température corporelle va donc s'élever. Tout d'abord, la réaction de son corps se traduit par une vasodilatation¹ qui, généralement, ne suffit pas : il transpire un liquide essentiellement composé d'eau. Si son corps arrive à

maintenir sa température à 37 °C, tout va bien. Mais c'est rarement le cas, et c'est là que les propriétés du textile importent (**Figure 1**).

Pour que la transpiration permette de refroidir le corps de façon optimale, il faut que cette eau liquide soit transformée en vapeur par le corps, et non pas par l'environnement, c'est-à-dire le vent ou la température extérieure. Bien évidemment, lorsque l'environnement est défavorable, s'il pleut ou s'il fait très chaud, le refroidissement par la transpiration devient plus difficile à contrôler (**Figure 2**).

De plus, selon les conditions météorologiques ou le sport pratiqué, plusieurs couches

1. Élargissement des vaisseaux sanguins permettant un afflux plus important de sang (et donc d'oxygène) dans les muscles.



Figure 1

La réaction du corps liée à l'effort.

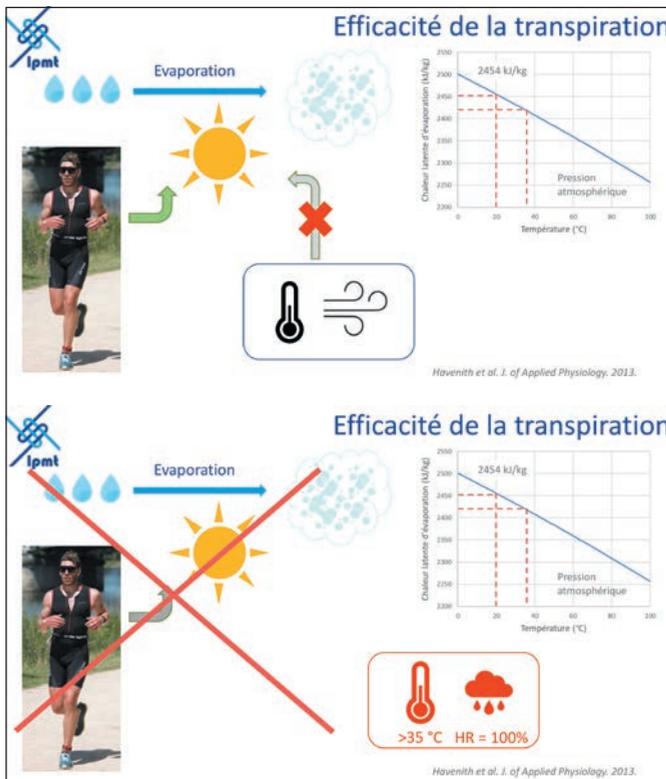


Figure 2

L'efficacité de la transpiration ne doit dépendre ni de la température extérieure, ni de la pluie.

de vêtements recouvrent la peau (Figure 3) : il peut n'y en avoir qu'une seule (ce qui sera toujours le cas pour les chaussettes, sans compter la chaussure), une deuxième, voire, s'il fait très froid, une troisième couche externe.

1 Les qualités requises pour le vêtement de sport

1.1. Gérer efficacement la transpiration

Gérer l'efficacité du refroidissement par la transpiration n'est pas simple. La Figure 4 représente différents cas. Sur cette figure, la ou les couches humides sont entourées en bleu. Le corps évacue la transpiration liquide par les pores de la peau. La peau est donc mouillée. Si la première couche de textile en contact avec la peau (C.1) évacue la transpiration transformée en vapeur, le rendement est maximal (environ 85 %). En revanche, si cette couche absorbe le liquide ou l'évacue vers l'extérieur ou vers d'autres couches, le rendement est faible. Plus le liquide est loin de la peau, moins le corps peut l'évaporer, et plus le rendement chute (jusqu'à 20 %). Le rendement de refroidissement par la transpiration dépend donc du textile contre la peau et de différentes couches successives.

Il faut donc que le vêtement contre la peau n'évacue pas instantanément la transpiration liquide, c'est-à-dire avant sa transformation en vapeur, mais qu'il évacue rapidement la transpiration vapeur avant qu'elle ne se

recondense. Quand il y a plusieurs couches, elles doivent évacuer rapidement la transpiration vaporisée.

1.2. Gérer les sollicitations cycliques et leurs conséquences

La **Figure 5** montre que le sport impose des sollicitations mécaniques cycliques diverses à différents endroits du corps qui varient selon le type de sport. Cela entraîne des zones de frottement au niveau du pied et des chaussettes pour la course ou la marche, entre les fesses et la selle pour le cyclisme, par exemple.

Ces sollicitations cycliques ont des conséquences différentes selon la zone impliquée : au niveau de la peau glabre (la plante des pieds), il se formera des ampoules ; dans d'autres zones aura lieu une irritation mécanique résultant des frottements (**Figure 6**). Pour caractériser ces sollicitations et ce niveau de frottement, on utilise communément le coefficient de frottement, qui est le rapport de la force de frottement sur la force d'appui (**Figure 6A**). En laboratoire, on le mesure généralement non pas sur le pied, mais sur la main ou l'avant-bras, par commodité.

La partie droite de la **Figure 6B** montre que lorsque la peau est humide, le frottement augmente.

Donc, non seulement la sollicitation est cyclique, ce qui use la peau, mais le frottement entre la peau et le textile augmente lorsque l'humidité de la peau croît. Par conséquent, le frottement du textile contre la peau humide doit être



Figure 3

Le vêtement de sport et le nombre de couches textiles nécessaires dépendent des conditions climatiques.

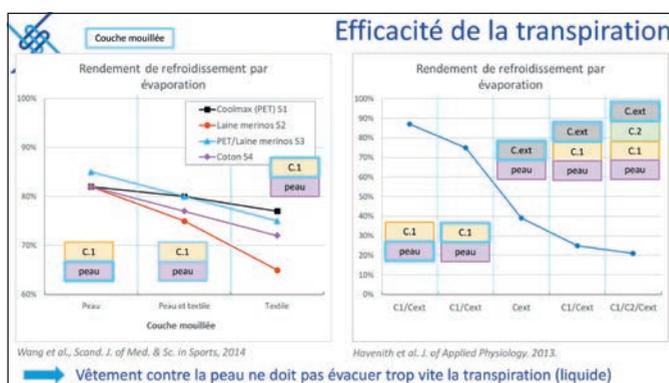


Figure 4

L'efficacité de la transpiration dépend de la nature du textile et du nombre de couches textiles.



Figure 5

Exemples de sollicitations mécaniques lors de l'effort.

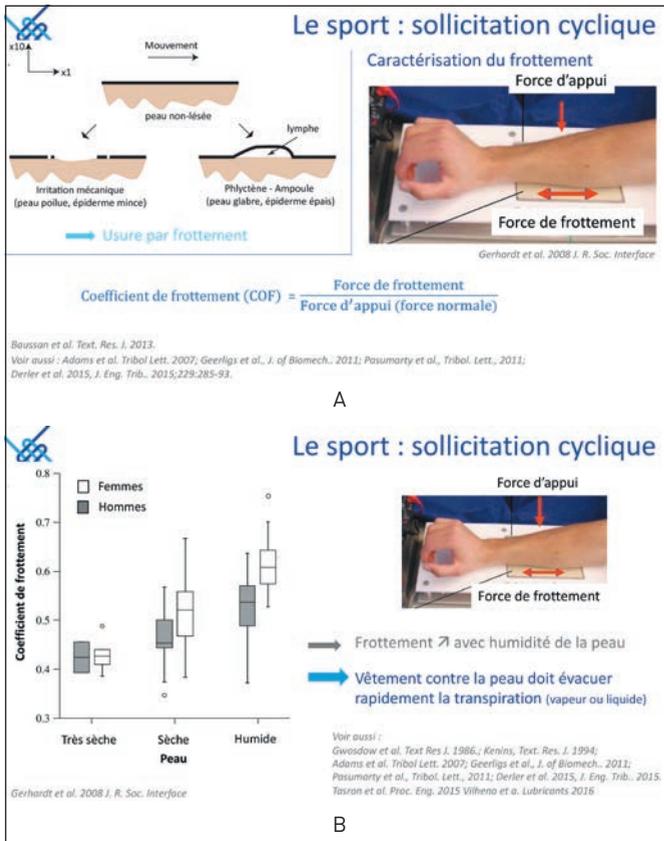


Figure 6

Frottements mécaniques et impacts en fonction de l'humidité de la peau.

limité ou le textile doit laisser la peau sèche.

1.3. Gérer le refroidissement du corps par la transpiration et les frottements contre la peau

Pour ce faire, plusieurs stratégies peuvent être graduellement mises en œuvre.

Tout d'abord, la transpiration vapeur doit être évacuée rapidement de la surface de la peau.

Si cela n'est pas ou plus possible, la transpiration liquide doit être rapidement évacuée

de la surface de la peau, en particulier dans les zones de frottement. Pour cela, elle doit être rapidement drainée vers des zones où les frottements sont plus faibles et des zones où la transpiration est moins importante, où le vêtement n'est donc pas saturé par la transpiration. En effet, la répartition de la production de transpiration dépend de la zone du corps. Ainsi, les épaules et le dos sont les zones où nous transpirons le plus, ensuite viennent le torse, les bras, les jambes et les fesses. Le vêtement doit donc transférer rapidement la transpiration liquide vers les zones qui sont peu sollicitées par les frottements.

Enfin, quand toutes les couches sont saturées en transpiration, la ou les différentes couches doivent retenir un maximum d'eau liquide.

1.4. Cahier des charges du textile d'un vêtement de sport

À partir de tous les éléments précédemment décrits, il est possible d'établir le cahier des charges du textile optimal pour le sport (Figure 7). Il se divise donc en différentes problématiques qui dépendent du vêtement concerné : couche contre la peau, couche intermédiaire ou couche extérieure. La couche en contact avec la peau doit être au plus près, mais sans la comprimer pour évacuer rapidement la transpiration vaporisée, drainer la transpiration liquide en dehors des zones de frottement et des zones saturées en liquide, puis retenir les liquides. La deuxième couche doit évacuer la vapeur. Enfin,

la couche extérieure doit protéger de la pluie et du vent. Enfin, selon les conditions, toutes les couches doivent protéger du froid.

2 Description d'une structure textile

Un textile est une structure multi-échelle. L'entité élémentaire est la fibre, qui est faite d'un ou de plusieurs polymères. Pour les fibres synthétiques (les polymères créés par l'homme), on peut jouer sur la forme de la fibre afin de lui donner les propriétés voulues. En revanche, il n'est pas possible de changer la forme de la fibre dans le cas de la laine ou du coton.

Plusieurs fibres sont assemblées sous la forme d'un fil, lui-même transformé soit sous la forme d'un tricot très déformable, donc utilisé plutôt contre la peau, soit sous la forme d'un tissu, plus résistant qu'un tricot, et donc utilisé pour la couche extérieure (Figure 8).

À chaque échelle, le textile (fibre, fil, tissu ou tricot) peut être fonctionnalisé² par des traitements essentiellement chimiques ou mécaniques. Enfin, on peut donner une forme finale par assemblage (confection) qui sera la forme 3D du vêtement. L'ensemble du procédé est très long et, à chaque échelle, on peut agir pour changer des paramètres qui influenceront les performances du vêtement final. Cependant, la prédiction n'est ni simple ni parfaite : les

² Fonctionnaliser une espèce chimique consiste à lui accrocher des groupements fonctionnels (alcool, ester...).

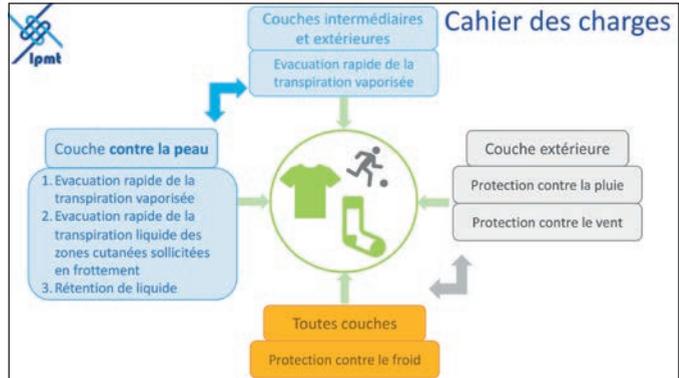


Figure 7

Cahier des charges des différentes couches d'un vêtement.

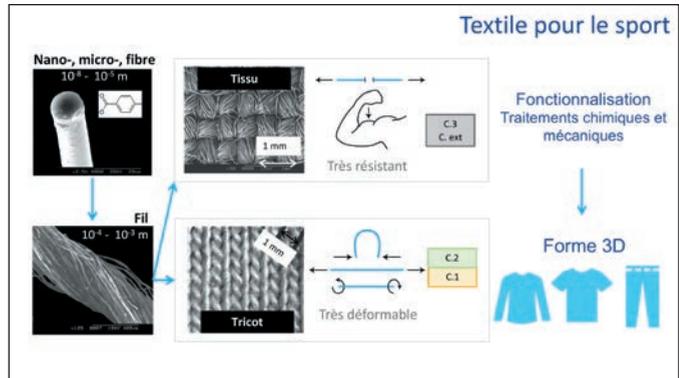


Figure 8

De la fibre au textile pour le sport.

recherches se poursuivent dans ce domaine.

3 Le vêtement au plus près de la peau

Pour que la couche soit le plus près possible de la peau, il faut utiliser un tricot très déformable. De plus pour que ce dernier soit déformable de façon réversible, un monofilament d'élasthanne (une fibre élastique polyuréthane, typiquement le Lycra® ou le Spandex®) est souvent ajouté (Figure 9).

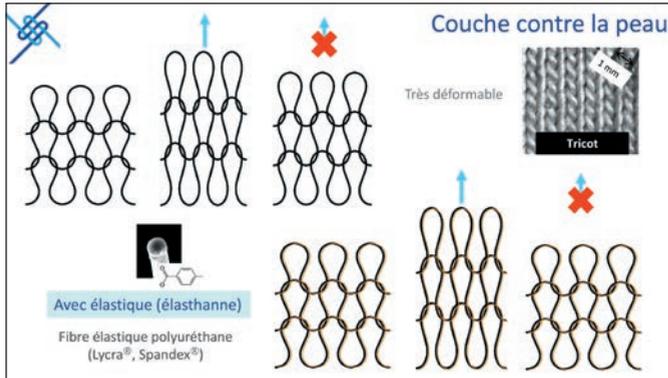


Figure 9

Pour être déformable de façon réversible, la couche contre la peau doit être un tricot réalisé avec l'ajout de filaments élastiques.

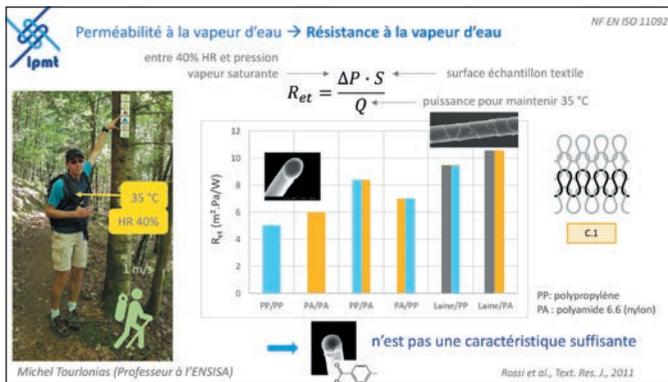


Figure 10

Résistance à la vapeur d'eau : influence du type de fibre et de la structure (monocouche ou bicouche).

la vapeur d'eau, ou la **résistance à la vapeur d'eau R_{et}** qui est inversement proportionnelle à la perméabilité (Figure 10). Attention, il ne faut pas confondre la perméabilité à la vapeur d'eau avec la perméabilité à l'air, même si de nombreux chercheurs font l'amalgame, la première étant liée à la seconde, mais la vapeur d'eau a d'autres interactions avec la matière que l'air.

Ces tests normalisés sont réalisés dans des conditions visant à simuler la marche.

Plus R_{et} est élevée, moins la vapeur d'eau passe au travers du tricot. La Figure 10 montre la variation de R_{et} pour une même structure de tricots réalisés avec des fils faits de fibres de différents polymères : polypropylène³, polyamide 6.6 (couramment appelé « nylon ») ou encore laine. La structure tricotée testée étant constituée de deux couches, les tests ont été réalisés sur différents mélanges de couches.

On voit que l'empilement d'une couche de polypropylène et d'une couche de polyamide n'aura pas de comportement intermédiaire entre l'empilement de deux couches de polypropylène et de deux couches de polyamide. De plus, le même comportement dépend de la face présentée en premier à la vapeur et n'est pas équivalent à celui de la superposition inverse. En revanche, lorsqu'on ajoute de la laine, on retrouve des comportements plus attendus, car en

4 Gestion de la transpiration vaporisée ou liquide

4.1. Évacuation de la transpiration vaporisée

Influence de la nature chimique de la fibre

L'évacuation rapide de la transpiration vaporisée est compliquée. Pour caractériser cette propriété, on utilise habituellement la **perméabilité** à

3. Polymère uniquement carboné formé de monomères possédant des doubles liaisons carbone-carbone.

cohérence avec le matériau pur : avec la couche de polypropylène, la résistance à la vapeur d'eau est inférieure à celle obtenue avec la couche de polyamide. L'ajout de laine augmente la R_{et} . En résumé, on voit néanmoins que le **polymère utilisé n'est pas une caractéristique suffisante** pour prévoir le comportement de la structure textile.

Influence de la géométrie de la fibre

Prenons l'exemple du polymère le plus courant dans le textile : le polyéthylène téréphtalate⁴ (couramment appelé « polyester »). La fibre est traditionnellement ronde, mais elle peut aussi être triangulaire, trilobée. De plus, elle peut être plus ou moins grosse (Figure 11). Supposons que toutes ces formes de fibre aient la même aire en section. On calcule de manière purement géométrique le **rapport des périmètres des fibres par rapport à celui de la fibre ronde équivalente**.

La Figure 11 montre que la **perméabilité à la vapeur d'eau des tricotés réalisés avec ces fibres diminue quand la valeur de ce rapport augmente**.

On peut extrapoler ces résultats en considérant la fibre Coolmax®, de section spécifique, appelée « *scalloped oval* », avec la fibre ronde de même section. La structure faite avec la fibre Coolmax® est moins perméable à la vapeur d'eau que celle faite avec la fibre ronde, ce qui semble être plutôt défavorable pour ce critère.

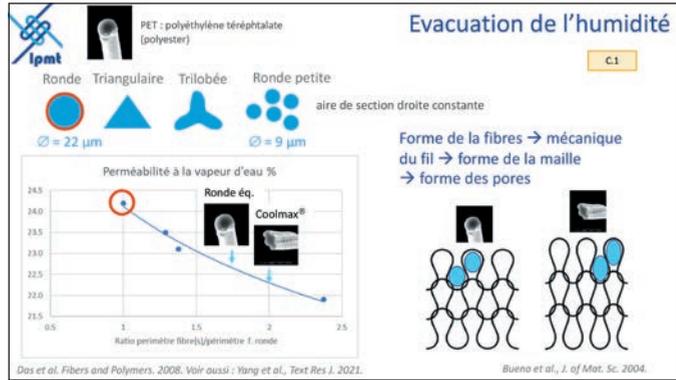


Figure 11

Variation de la perméabilité à la vapeur d'eau avec la géométrie de la fibre textile.

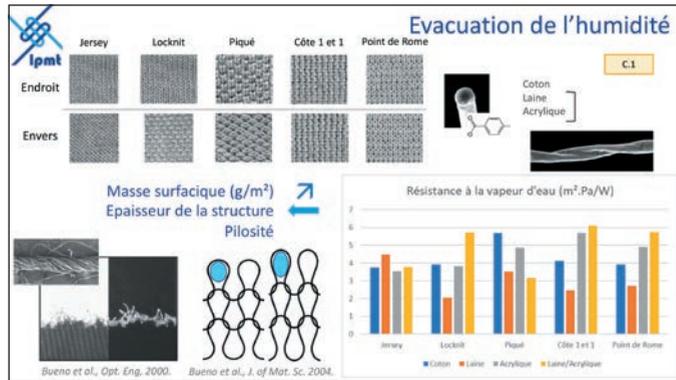


Figure 12

La résistance à la vapeur d'eau dépend de la masse surfacique, de l'épaisseur de la structure et de la pilosité.

On peut se demander comment la forme de la section d'une fibre dont la largeur (ou le diamètre, si elle est ronde) d'une dizaine de micromètres peut influencer à ce point la perméabilité à la vapeur d'eau du tricot.

Il a été prouvé que le polymère, d'une part, et la forme de la fibre, d'autre part, influencent la mécanique du fil en influençant la forme de la maille

4. Polymère plastique de la famille des polyesters.

élémentaire du tricot et donc la forme des pores formés par la structure (**Figure 11**). **C'est en effet la porosité qui est fondamentale pour la perméabilité à la vapeur d'eau.**

Influence de la structure du textile

De nombreux articles scientifiques traitent de ce sujet. Un exemple d'étude multicritère est présenté (**Figure 12**). La résistance à la vapeur d'eau définie précédemment R_{et} est étudiée en faisant varier différents paramètres du textile (déjà définis). Aussi, sont utilisées :

- différentes fibres : coton, laine, acrylique permettant d'obtenir des fils constitués uniquement de chacune de ces fibres, d'un fil constitué de fibres de laine et d'acrylique ;
- différentes structures de tricot : pour les t-shirts comme le jersey, le locknit ou la côte 1/1, voire le point de Rome ou encore dans les polos pour le piqué.

Le diagramme de la **Figure 12** montre qu'il est impossible de définir des tendances sur la structure ou la matière. En

effet, les paramètres importants sont en fait la masse surfacique du textile (en grammes par mètre carré) et l'épaisseur de la structure, toutes deux traduisant la quantité de matière dans le volume (mais la masse volumique est très peu utilisée en textile) et la pilosité. La présence fréquente de pilosité à la surface des textiles est une caractéristique particulière de ces matériaux. Elle peut être facilement observée en lumière rasante (**Figure 13, en bas**). Comme dans le cas précédent, la fibre constitutive du fil va influencer le comportement mécanique du fil, et donc la porosité du tricot. De plus, la pilosité des fils constitutifs de ces textiles va également modifier cette porosité en bouchant plus ou moins les pores de la structure tricotée. **Cela montre une fois encore que la porosité à ces différentes échelles est fondamentale pour la perméabilité à la vapeur.**

4.2. Évacuation de la transpiration liquide

Mécanismes

Un liquide peut être transporté dans un textile selon différents mécanismes (**Figure 12**) dépendant de la chimie de la fibre, des traitements chimiques appliqués et de la structure de ce textile à chaque échelle de la structure (selon la description faite précédemment en 2). Tout d'abord, la surface peut être considérée comme étant plus ou moins hydrophile

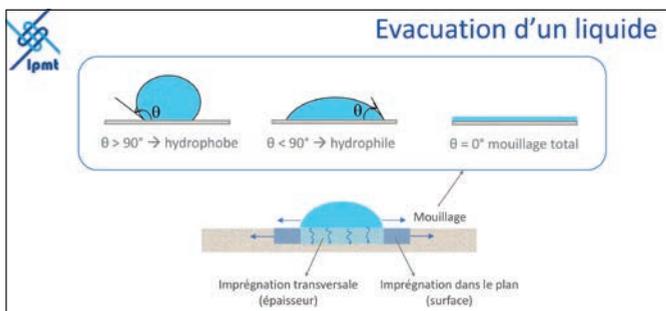


Figure 13

Interaction d'un liquide avec un matériau textile.

ou hydrophobe⁵. Ensuite, l'eau peut se diffuser (imprégnation) à l'intérieur du matériau dans le plan de la surface ou dans l'épaisseur, soit par capillarité entre les fibres, soit par absorption de l'eau par les fibres, qui, dans ce cas, sont hygroscopiques.

Influence de la géométrie de la fibre

À partir des tricots considérés précédemment (4.1.), réalisés avec des fibres de polyéthylène téréphtalate de différentes géométries, la hauteur de montée capillaire, correspondant à une diffusion du liquide dans une direction du plan de la surface textile, est considérée (Figure 14).

Si l'on reprend comme paramètre le **rapport des périmètres des fibres par rapport à celui de la fibre ronde**, on voit que la diffusion du liquide, donc sa capacité à être évacué de la zone concernée, augmente avec le périmètre de la fibre (Figure 14). De même, par extrapolation, on peut voir que la fibre Coolmax® va mieux diffuser l'humidité à sa surface que la fibre ronde de section équivalente. Sur ce critère, cette forme de fibre est donc efficace.

Influence de la structure de textile

Analysons maintenant l'évacuation du liquide dans l'épaisseur du textile, et ceci à partir de trois structures tricotées différentes réalisées selon la

5. Une surface simplement hydrophile permet uniquement à l'eau de s'étaler à sa surface, tandis qu'un matériau menant à un mouillage total est capable de faire entrer des molécules d'eau au sein de sa structure nanoscopique.

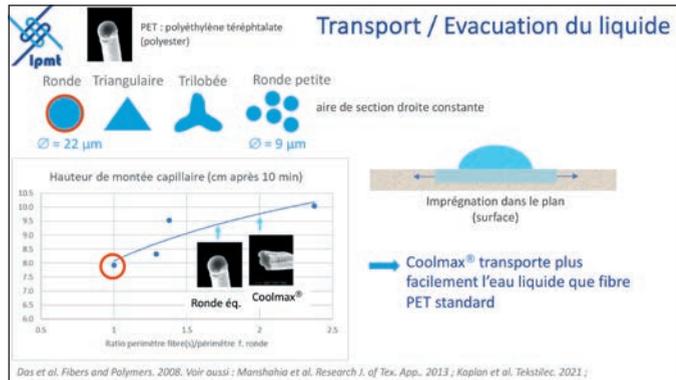


Figure 14

Évacuation du liquide dans le plan en fonction de la géométrie de la fibre.

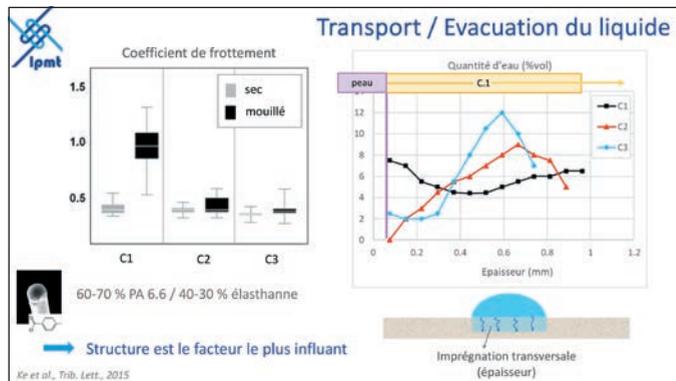


Figure 15

Influence de la structure sur l'évacuation de l'eau dans l'épaisseur du textile (à droite) et sur le coefficient de frottement contre la peau sèche et mouillée (à gauche).

même composition de fibres. On peut constater, sur la Figure 15, à droite, que :

- le textile C1 (en noir) est mouillé sur la surface en contact avec la peau et dans son épaisseur, et ce de façon presque identique ; donc l'interface peau-textile est mouillée ;
- les textiles C2 et C3 (rouge et bleu) sont secs sur la surface en contact avec la peau, donc l'interface peau-textile

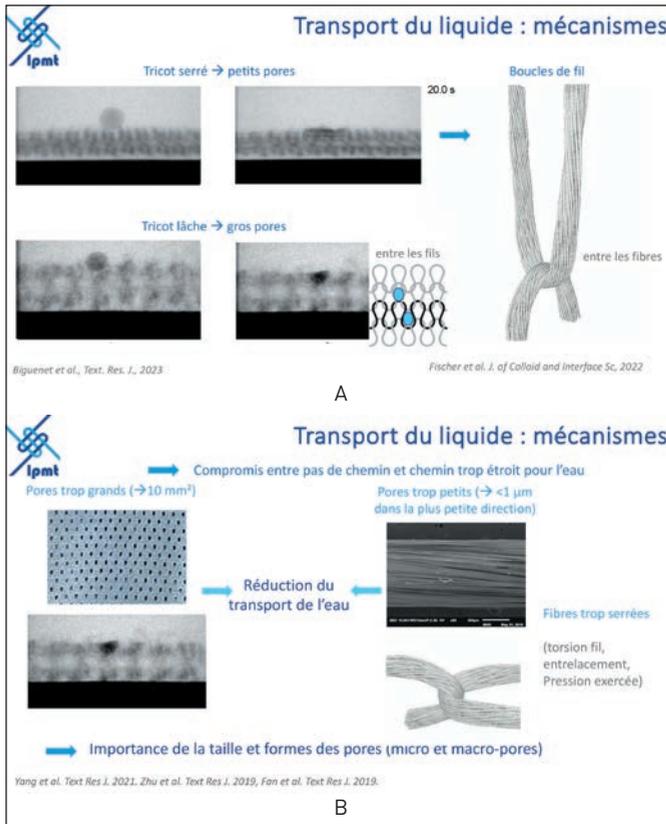


Figure 16

Mécanisme de transport de liquide au sein d'un textile.
 A. Influence de la taille des pores.
 B. Influence de la taille et de la forme des pores.

est sèche ; en revanche, le liquide est contenu dans leur épaisseur.

Cela va avoir une influence importante sur le frottement peau-textile. En effet, les coefficients frottement peau-textile pour ces trois structures ont été mesurés (**Figure 15, à gauche**) et montrent que pour les textiles C2 et C3, le frottement reste presque identique, que la peau soit humide ou pas, alors qu'il augmente fortement pour C1 mouillé. En effet, avec C2 et C3, la peau ne reste pas

mouillée, car l'humidité se diffuse de la surface vers le cœur de la structure.

Influence de la porosité

Nous pouvons identifier plus globalement l'origine des différents mécanismes mis en jeu.

La **Figure 16A** montre que dans le cas d'un tricot serré (petits pores), quand on écrase une goutte elle s'étale en surface. Si le tricot est lâche (gros pores), l'eau va rester bloquée entre les gros pores.

Dans le cas d'un tricot serré, l'eau passe d'une fibre à l'autre par capillarité ; le temps de passage peut être influencé par le polymère (en particulier son caractère plus ou moins hydrophile), mais également en changeant la taille des capillaires par la grosseur des fibres, la torsion des fils, la géométrie d'entrelacement des fils (**Figure 16B**).

4.3. Rétention de la transpiration liquide

La rétention du liquide, exprimée en grammes de liquide par grammes de textile en fonction du temps, est montrée pour différents textiles (**Figure 17**). Il s'agit de différents tricots réalisés à partir de fibres diverses. Dans le cas du tricot en polypropylène, polymère naturellement hydrophobe, l'imprégnation du liquide est plus lente et moins importante qu'avec un matériau absorbant comme le coton. Dans ce cas, c'est la chimie des fibres qui gouverne de façon prépondérante la rétention.

En revanche, lorsqu'on mélange des fibres hydrophiles (polyéthylène téréphtalate et

coton), dont certaines absorbantes (coton) avec des fibres très hydrophobes comme le polytétrafluoroéthylène⁶ selon une structure textile particulière, on peut obtenir un matériau qui sera peu imprégné et retiendra l'eau. **Dans ce cas, la structure textile, donc l'agencement des fibres, est très influente.**

5 Protection contre le froid

5.1. Mécanisme prépondérant

La nature du matériau joue assez peu dans la protection contre le froid. Le facteur important est ce qui va permettre d'emmagasiner de l'air. Ainsi, la **Figure 18, à gauche** compare la conductivité thermique⁷ pour différentes fibres telles que le polyamide 6.6 (nylon), le polyéthylène téréphtalate (polyester), le polypropylène avec la conductivité thermique de l'air. L'air est un meilleur isolant thermique que ces matériaux ; de plus, il est peu cher et disponible en grande quantité. Aussi, **la protection contre le froid dépend essentiellement du volume d'air emmagasiné.** Le but est donc d'emprisonner de l'air.

5.2. Stratégies utilisées pour emprisonner de l'air

Le textile composite fibres/air

De façon systématique, l'air est retenu initialement dans

6. Polymère formé par la répétition de motifs (CF₂).

7. Grandeur physique quantifiant la capacité d'un matériau à laisser passer la chaleur en son sein.

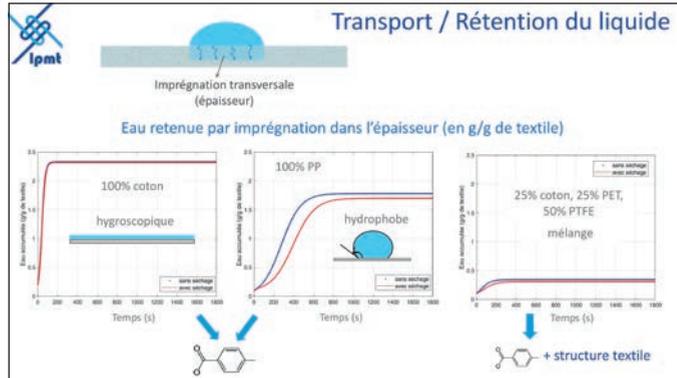


Figure 17

Rétention de l'eau liquide en fonction de son interaction avec les fibres et de la structure du textile.

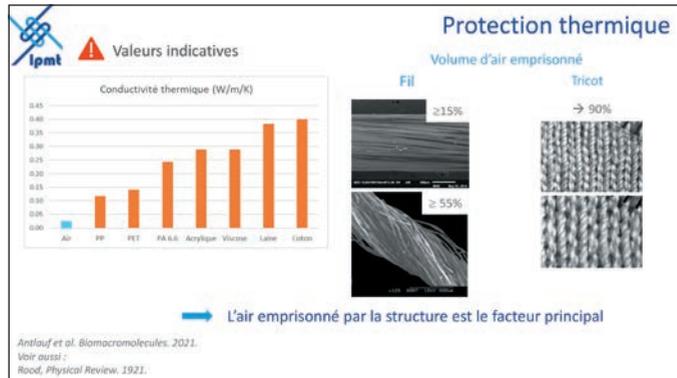


Figure 18

Efficacité de l'air comme isolant thermique. L'air emprisonné par la structure est le principal facteur de la protection thermique.

les fibres : dans un fil fait de fibres discontinues, type coton, il y a naturellement 55 % d'air, voire plus. Il est également possible de jouer sur l'espacement des fibres (torsion du fil), sur la structure du textile (ex. : tricoter un même fil, mais avec des tailles de maille différentes, donc différents états de gonflement du fil), ou encore de changer la structure du tricot ou du tissu (par exemple

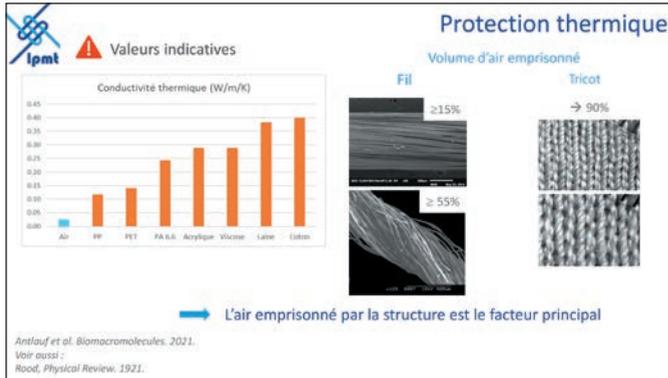


Figure 19

Le volume d'air emprisonné dans la pilosité artificielle ou entre les couches de vêtement augmente la protection thermique du matériau constitutif.

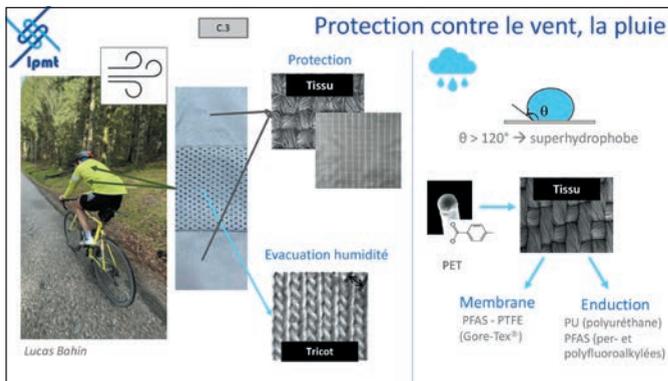


Figure 20

Protection contre le vent et la pluie.

son épaisseur] pour augmenter le volume d'air emprisonné (Figure 18, à droite). Un textile peut donc naturellement contenir plus de 90 % d'air en volume.

Le rôle de la pilosité artificielle

Pour augmenter encore le volume d'air emprisonné dans la structure textile, on peut créer de la pilosité (Figure 19). Dans le vêtement de sport,

on va typiquement retrouver une structure tricotée serrée pour réduire la perméabilité à l'air, et en particulier au vent : sur la face endroit, les mailles sont bien visibles ; sur l'envers, de la pilosité a été créée en grattant le textile. Cette pilosité enferme de l'air à plus de 90 %.

Cela semble équivalent au cas précédent de gonflement du fil, mais il n'en est rien. Le cas ci-dessus serait celui d'un pullover avec de grosses mailles et de larges pores. Il s'agit donc d'une structure plutôt perméable à l'air. L'air est emprisonné essentiellement dans ces pores et, lorsqu'il y a du vent, l'air chaud emprisonné dans la structure est remplacé par de l'air froid. Dans une structure serrée, avec un faible gonflement du fil au niveau des mailles, la perméabilité à l'air est plus faible. Aussi, la face endroit vers l'extérieur présente des pores étroits et est donc peu perméable à l'air, ce qui permet d'emprisonner durablement l'air chaud dans la pilosité. Cette structure est donc isolante tout en étant assez peu perméable au vent.

L'empilement de couches de vêtement

Pour augmenter encore l'air emprisonné et protéger davantage le corps du froid, une solution efficace consiste à multiplier les couches de vêtement. L'air chaud emprisonné entre chacune de ces couches isole du froid, même si l'épaisseur est faible. Il faut cependant que la dernière couche ne soit pas ou très peu perméable à l'air, donc au vent. Souvent, le

vêtement extérieur est lui-même constitué de plusieurs couches (au moins deux).

5.3. La protection contre le vent et la pluie

La couche extérieure doit servir de protection contre le vent (**Figure 20**). Une des stratégies possibles pour lutter contre le vent tout en évacuant la transpiration gazeuse est de mettre un tricot poreux, qui va favoriser l'évacuation, couplé à un autre tissu, qui va assurer les autres fonctions. La partie poreuse est mise sur les côtés (où la protection contre le vent

n'est pas nécessaire). De plus, dans le cas d'un sport où on se déplace rapidement, comme le cyclisme, on peut rajouter un tricot poreux également sur le dos, car la protection contre le vent n'y est pas nécessaire et c'est une zone où l'on transpire beaucoup (décrites précédemment).

Pour lutter contre la pluie, la couche extérieure doit être très hydrophobe. Pour cela, soit on intègre une membrane de polytétrafluoroéthylène (cas du Gore-Tex®), soit on enduit le tissu d'une couche de polyuréthane ou de polyfluoroalkyles.

Conclusion et perspectives

Le confort thermique et mécanique d'un vêtement de sport est le fruit d'un procédé de fabrication long et complexe qui ne se résume pas au caractère esthétique du produit ni à sa composition chimique (seule information donnée sur les étiquettes).

Les vêtements du sportif ou de la sportive sont loin d'être optimaux. Les recherches dans ce domaine consistent encore à optimiser les mélanges de fibres pour leur interaction avec l'eau et à optimiser la distribution de la porosité et de la pilosité (ce point est loin d'être résolu).

De plus, aujourd'hui, les moyens de protection contre la pluie sont efficaces mais posent des problèmes environnementaux. Il faut donc trouver un substitut au polytétrafluoroéthylène (qui est un PFAS), mais également au polyuréthane, qui pose des problématiques de recyclage (**Figure 21**).

Par ailleurs, on parle beaucoup de la pollution par les textiles. La courbe de l'évolution de la consommation des fibres dans le monde depuis

1980 montre que toutes les fibres se sont à peu près maintenues sauf le polyester pour lequel la demande a explosé (**Figure 22**). Or, le polyester, pétrosourcé et non biodégradable, est le constituant principal des vêtements de sport. Il convient donc de trouver un substitut à ce matériau et de réduire notre consommation de textile, y compris de vêtements de sport, et de trouver des solutions de recyclage pendant la phase de transition vers une consommation raisonnée.

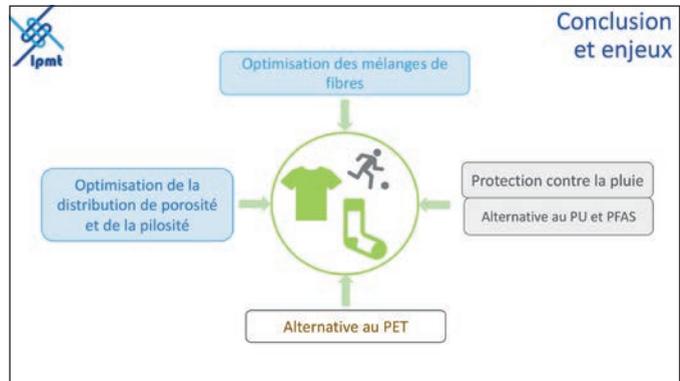


Figure 21

Panorama des enjeux concernant la recherche sur le textile.

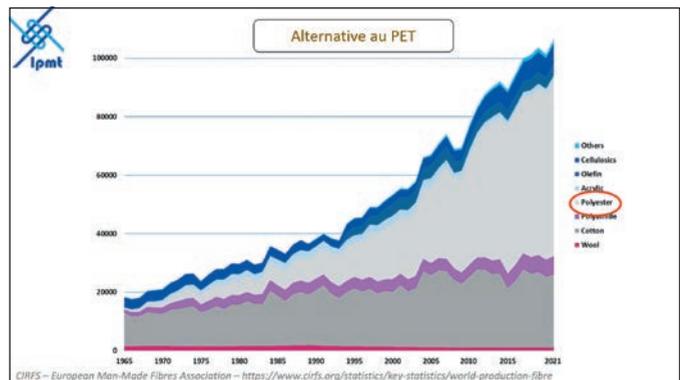


Figure 22

Évolution de la consommation en fibres depuis 1980.

Partie 2

Les molécules
de la performance

Matériaux de haute performance au service du (handi-) sport

D'après la conférence de Virginie Couharde Louvel et Philippe Brasseur au colloque « Chimie et sports olympiques ».

Ce chapitre est rédigé à partir de la conférence donnée par Mme Couharde Louvel et M. Brasseur au colloque « Chimie et sports » de la Maison de la Chimie le 8 février 2024. Les travaux s'appuient sur les réalisations de Syensqo, qui est la chimie de spécialité du groupe Solvay. Virginie Couharde Louvel est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en polymère et d'un master en Propriétés physiques et chimiques des polymères. M. Brasseur est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en mécanique.

1 Présentation de Syensqo

1.1. Historique de la société Solvay

Syensqo est le nom d'une entreprise créée en 2023 à partir de Solvay après la séparation de ses branches matériaux avancés. Solvay était l'une des entreprises phares de la chimie mondiale dont l'histoire est résumée ci-après.

En 1863, Ernest Solvay invente un nouveau procédé de fabrication du carbonate de sodium. En



La Conférence Solvay de 1911 constitue un tournant dans la collaboration et la réflexion visionnaire.

En effet, Ernest Solvay a réuni 24 des esprits scientifiques les plus brillants de son époque, dont Albert Einstein et Marie Curie.

Ce fut plus qu'une simple rencontre de brillants scientifiques : c'était une extraordinaire convergence d'explorateurs, animés par une passion commune pour percer les mystères de l'univers.

Dans l'esprit de ces esprits pionniers, Syensqo apparaît comme une marque qui embrasse l'héritage de la Conférence Solvay, incarnant le même esprit aventureux et le même état d'esprit avant-gardiste.

A l'instar de ces explorateurs intrépides qui ont osé repousser les limites de ce qui était connu, Syensqo se lance dans sa propre odyssée de découverte scientifique, explorant de nouveaux territoires et découvrant des idées transformatrices.

Figure 1

Conférence Solvay.

1880, il crée la société Solvay, première multinationale industrielle opérant simultanément en Europe et aux États-Unis. L'implication précoce de Solvay dans la science est démontrée par une réunion organisée en 1911 avec la participation de 24 des esprits scientifiques les plus brillants de l'époque, dont Marie Curie et Albert Einstein, un événement qu'on a appelé la « Conférence Solvay » (Figure 1).

Dans l'esprit des pionniers, Syensqo a pour objectif de lancer sa propre lignée de découvertes scientifiques en explorant de nouveaux territoires et des idées transformatrices. La science et les partenariats ont toujours été au cœur de Solvay depuis sa création en 1880 (Figure 2) et le sont maintenant chez Syensqo.

Syensqo, et son parent Solvay, s'affirme comme toujours attentif aux préoccupations environnementales. C'était déjà le cas en 1965 avec le développement de polysulfones dans le domaine de la

dialyse¹, ou en 1978 avec le développement du polyéthylène-réthercétone (PEEK). Ce dernier a permis de supprimer l'utilisation du métal dans de nombreux usages, notamment pour rendre les avions plus légers et plus économes en carburant. C'est avec ce même esprit que la société a sponsorisé en 2016 le voyage Solar Impulse² autour du globe, et également mis en place en 2018 un partenariat avec la Fondation Ellen MacArthur pour arriver, en 2023, à la création de Syensqo. Soulignons enfin que Syensqo dispose de différents matériaux de haute performance comme catalyseurs dans le domaine sportif.

1.2. Généralités sur les polymères

Abordons les polymères de manière élémentaire.

1. Dispositif dans lequel circule le sang pour être épuré à travers une membrane semi-perméable.

2. Premier avion à avoir effectué un tour du monde sans carburant ni émission polluante pendant le vol.

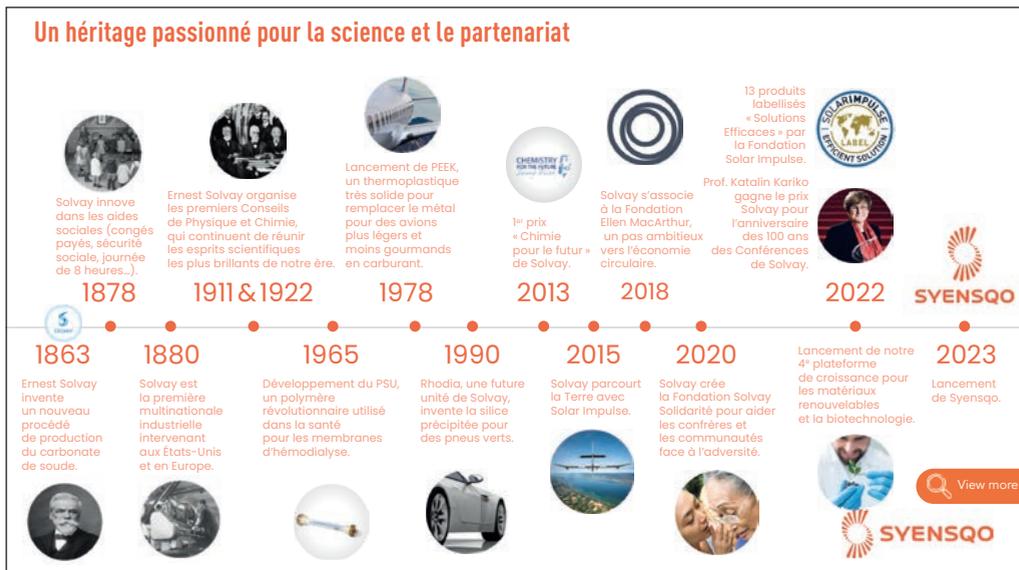


Figure 2

Frise chronologique des évènements marquants depuis la naissance de Solvay.

La synthèse des polymères débute par l'association de monomères, représentés comme de petites « boules » d'atome de carbone, en chaînes constituant ce que l'on appelle un « polymère » (Figure 3). Pour conférer des propriétés spécifiques, ces chaînes sont liées entre elles de manière précise ou arrangées en réseaux tridimensionnels. La majorité des polymères actuels sont conçus selon ces principes.

Les méthodes de renforcement des matériaux se sont diversifiées au fil des décennies. Les techniques courantes incluent le mélange de polymères avec des fibres soit de verre pour leur résistance et leur coût avantageux, soit de carbone pour leur rigidité et leur légèreté. Selon l'application visée, ces fibres peuvent être courtes ou longues.

On distingue deux catégories de matériaux : les plastiques injectables et les composites. Les premiers sont obtenus par injection d'un mélange de polymères et de fibres, tandis que les seconds sont fabriqués à partir de bandes de polymères imprégnées de fibres



Figure 3

Schéma relatif aux polymères.

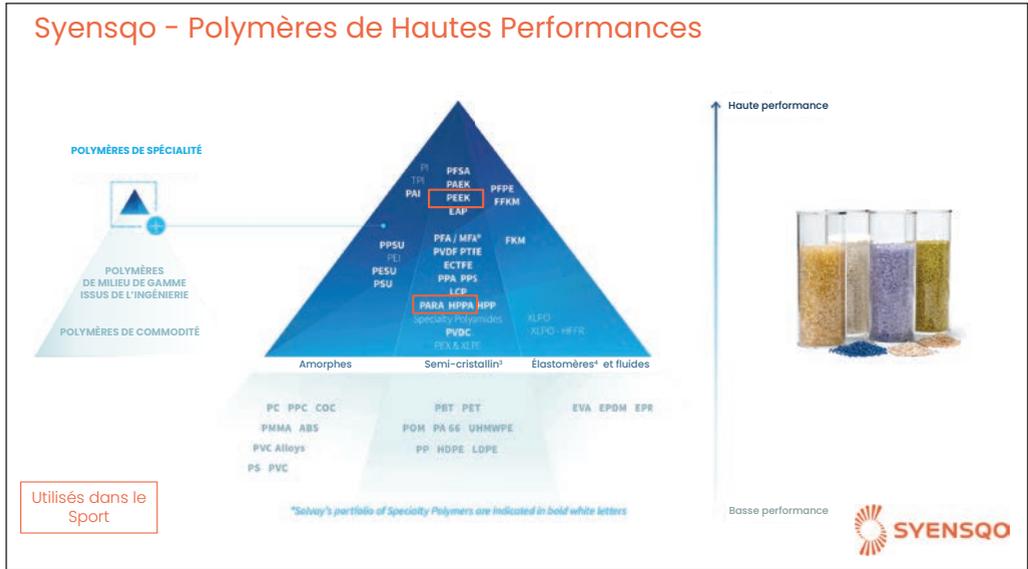


Figure 4
Pyramide des plastiques.

de carbone ou de verre, mises en forme sur un gabarit pour obtenir les propriétés mécaniques désirées.

1.3. Propriétés des polymères

La rigidité est un aspect crucial. Les polymères classiques, utilisés seuls, offrent une rigidité limitée. L'ajout de fibres de verre ou de carbone permet d'augmenter significativement cette rigidité, rivalisant ainsi avec les métaux tout en conservant les avantages des polymères, tels que la résistance à la corrosion et une faible densité.

La pyramide des plastiques (**Figure 4**) illustre la diversité des polymères disponibles, des polymères de commodité aux polymères de spécialité, ces derniers étant proposés

par Syensqo pour des applications exigeant des performances supérieures.

1.4. Les polymères chez Syensqo

Au sein de Syensqo, pour les applications dédiées au domaine sportif, l'entreprise privilégie l'utilisation de polyamides aromatiques. Ces derniers se distinguent par l'incorporation de noyaux benzéniques ou aromatiques à la chaîne carbonée classique, conférant ainsi aux matériaux des performances supérieures en termes de résistance thermique, chimique, ainsi qu'une durabilité accrue. Pour renforcer ces propriétés, ces

3. Matériau possédant des zones cristallisées et des zones non cristallisées.

4. Caoutchouc synthétique.

produits sont combinés à des fibres de verre ou de carbone, permettant ainsi d'atteindre une rigidité optimale tout en maintenant une faible densité. Par ailleurs, Syensqo emploie également le polyétheréthercétone (PEEK), un matériau remarquable pour ses propriétés exceptionnelles, telles qu'une résistance thermique pouvant atteindre 300 °C, une excellente lubrification, et sa capacité à être employé dans des applications spécifiques, comme la fabrication de roues dentées.

La **Figure 5** illustre un exemple de pièce composite élaborée à partir de matériaux composites renforcés par des fibres de carbone, développés par Syensqo. L'entreprise est en mesure de fournir non seulement le polymère nécessaire à la production de ces composites, mais également des bandes préimprégnées de fibres de verre ou de carbone à très haute résistance mécanique. Ces dernières constituent l'élément le plus spécifique du produit fini. Cette technique permet de réaliser des pièces où les bandes sont tressées de manière à conférer aux composites des propriétés mécaniques ciblées, orientées selon des directions spécifiques.

Actuellement, l'un des principaux défis rencontrés dans le domaine des matériaux composites réside dans la composition de la matrice, souvent constituée de résines thermodurcissables. Ces dernières, une fois exposées à la chaleur, perdent leur capacité à se ramollir ou à fondre, ce qui entrave considérablement leur recyclabilité. À l'opposé,



Figure 5

Composites proposés par Syensqo.



Figure 6

«Syensqo 4 Sport Initiative».

les résines thermoplastiques se présentent comme une alternative prometteuse pour la conception de composites recyclables. En effet, ces matériaux peuvent être refondus et, par conséquent, recyclés, offrant ainsi une solution viable pour surmonter les limitations environnementales associées aux résines thermodurcissables.

2 Partenariats sportifs de Syensqo

Syensqo a toujours été le fervent supporter du sport. On le démontre notamment à travers le programme



Figure 7

Syensqo, sponsor de l'équipe DS PENSKE de formule E.



Figure 8

Syensqo, partenaire technologique des équipes américaines de bobsleigh et skeleton.



Figure 9

Prothèses de course.

Ambra Sabatini, médaille d'or en sprint sur le 100 m et détentrice d'un record en 14'11'' dans sa catégorie ; Trenten Merrill, en longueur, et Kgothatso Montjane, en tennis. En deux ans, Syensqo a promu des valeurs incarnées par ces sportifs telles que la performance, le dévouement, la persévérance, qui sont également des valeurs très importantes pour tous les salariés de notre société.

Ces valeurs sont également liées à un partenariat de 3 ans avec l'équipe de formule E, DS PENSKE (Figure 7). Incidemment, il faut noter que la formule E est le premier sport certifié empreinte carbone nette 0.

Pour ce partenariat, l'objectif est de partager une valeur commune : **repousser les limites de la technologie**. C'est ce que les ingénieurs de Syensqo cherchent à faire tous les jours avec les matériaux présents en portefeuille ou avec ceux sur lesquels on travaille pour l'avenir, en particulier **défendre la durabilité**. On est également en étroite collaboration, en tant que partenaire technologique, avec des équipes américaines, que ce soit pour le bobsleigh⁵ ou le skeleton⁶ (Figure 8). On leur fournit des matériaux composites avancés en fibres de carbone pour soutenir leur performance et leur désir de rapidité et d'excellence en compétition.

«Syensqo 4 Sport Initiative» (Figure 6).

C'est un partenariat établi avec 3 médaillés internationaux et athlètes paralympiques détenteurs de records :

5. Course de traîneau articulé à plusieurs places, pour descendre à grande vitesse sur des pistes de neige aménagées.

6. Course de luge utilisée sur des pistes de neige durcie, sur laquelle le coureur est couché à plat ventre.

3 Les matériaux de haute performance Syensqo au service du sport

D'autres applications sportives utilisent les matériaux de haute performance de Syensqo.

3.1. Application 1 : prothèses de course

La première application développée à l'intention des sportifs concerne une lame de prothèse, actuellement réalisée en composite à base de fibre de carbone continue (Figure 9). Ce matériau répond parfaitement aux exigences spécifiques de cette application, offrant une légèreté remarquable – beaucoup plus grande que les alternatives métalliques – grâce à l'association du carbone et du polymère. La méthode de fabrication, impliquant la superposition minutieuse de bandes, confère à la lame une capacité exceptionnelle d'absorption et de restitution de l'énergie lors des impacts, tout en préservant une résistance à la torsion cruciale pour maintenir l'équilibre du sportif lors de mouvements latéraux. Cette application pousse les limites des performances matérielles, étant donné les exigences élevées en termes de performance.

3.2. Application 2 : arc à poulie

La seconde application ne repose pas sur un composite, mais sur un processus d'injection (comme mentionné précédemment, voir 1.1.). Les branches de cet arc à poulie (Figure 10) sont constituées



Figure 10

Arc à poulie.



Figure 11

Vélo électrique.

d'un polymère de type PolyArylAmide, renforcé par des fibres de verre, offrant une gamme d'attributs particulièrement avantageux.

La rigidité est primordiale pour maximiser la vitesse de la flèche. De plus, une certaine flexibilité est requise. Grâce à une conception soigneusement élaborée, il est possible d'atteindre un niveau de flexion significatif sans induire de déformation permanente ou de rupture prématurée.

Légèreté de l'équipement possible : en effet, les polymères mêmes chargés de fibres sont bien plus légers que le métal.



Figure 12

Planche de Kite-foil.

Et puis on parle d'**esthétique**. Cela peut paraître superflu, mais c'est important. Ainsi, pour cet arc fabriqué par la maison Roland, le polymère de Syensqo choisi permettra d'allier un état de surface impeccable et une couleur sans aucune opération de peinture.

3.3. Application 3 : vélo électrique

La légèreté de l'équipement est un atout notable : en effet, les polymères, même renforcés de fibres, demeurent significativement plus légers que le métal (Figure 11). L'esthétique, bien que pouvant sembler secondaire, revêt une importance cruciale. Par exemple, pour l'arc produit par la maison Roland, le choix d'un polymère spécifique de Syensqo permet d'obtenir une finition de surface et une coloration impeccables, sans nécessiter de peinture supplémentaire.

Reconsidérons les avantages des polymères renforcés de fibres par rapport au métal, en commençant par l'aspect de la production locale. De nos

jours, la fabrication d'un vélo se déroule majoritairement en Asie, en raison du coût de la main-d'œuvre plus avantageux, bien que cela implique une logistique onéreuse et prolongée. Le recours au procédé d'injection, facilitant la production rapide de pièces prêtes à l'emploi et optimisant à la fois le nombre des composants et le processus d'assemblage, permet d'atteindre un coût de fabrication compétitif.

3.4. Application 4 : foil de kitesurf

La dernière application examinée concerne un foil de kitesurf (Figure 12). L'objet de notre travail ne réside pas dans la planche elle-même, mais dans le foil, cet élément partiellement immergé qui, en augmentant la vitesse du pratiquant, permet à la planche de s'élever au-dessus de l'eau, lui conférant ainsi la capacité de « voler ». Le foil est conçu à partir d'un matériau composite, choisi pour ses propriétés de stabilité, de rigidité et sa capacité à minimiser les torsions et vibrations, semblables aux exigences structurelles d'un avion. L'utilisation de composites est ici primordiale, car une technique d'injection simple ne serait pas adaptée en raison des spécificités des résistances mécaniques requises.

Conclusion

Il est frappant de voir à quel point les matériaux «nouveaux», en particulier les composites, ont envahi le sport de haut niveau. Ces matériaux ont été découverts ou inventés il y a plusieurs décennies, mais leur utilisation à grande échelle demandait aussi l'approche industrielle qui, elle aussi, se fait sur plusieurs années. Grâce à des collaborations judicieuses avec des partenaires français et étrangers, grâce aussi à une recherche menée en interne, Syensqo a réussi à relever et à gagner ce défi.

Mais attention, l'aventure n'est pas finie. La démarche «recherche et développement» qui a bien fonctionné ne sera jamais terminée. Il y a de beaux jours pour les matériaux, pour le sport et... pour Syensqo.

SOURCES

<https://www.syensqo.com/en/chemical-categories/specialty-polymers>

<https://www.syensqo.com/en/chemical-categories/our-composite-materials-solutions>

<https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-partners-3-record-holding-athletes>

<https://www.syensqo.com/en/press-release/syensqo-sponsor-ds-penske-formula-e-team>

<https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-and-debotech-announced-usa-bobsled-and-skeleton-technology-partners>

<https://www.syensqo.com/en/podcast/sport-and-determination>

<https://arc-rolan.fr/arc-cambium/>

<https://www.solvay.com/en/press-release/solvays-xencor-lft-chosen-stajvelo-first-all-polymer-e-bike>

Syensqo internal library

Arkema_{et} ses biomatériaux au service des athlètes

Danièle Olivier, Vice-Présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie, d'après la conférence de :

- Jérôme Allanic, ingénieur en plasturgie, Directeur du marché mondial Sport de Arkema ;

- Jun Mougner, docteur en chimie des polymères, responsable Innovation du marché mondial Sport de Arkema.

Introduction

Dans le domaine des matériaux, Arkema propose à ses clients des solutions réparties en trois segments (**Figure 1**) :

- Solutions adhésives : tout ce qui concerne le collage et l'assemblage, qui sont très utilisés au niveau industriel comme au niveau du grand public.
- Solutions de revêtement : elles englobent les vernis et tous les produits proposés pour la protection et le revêtement des bâtiments industriels, la résistance thermique¹

1. Capacité d'un matériau d'isolation à résister à un flux de chaleur qui le traverse.

et la résistance aux rayonnements UV.

- Matériaux avancés : pour trouver de nouveaux matériaux haute performance, plus légers, recyclables et biosourcés.

Ce chapitre a pour but de présenter des exemples de biomatériaux qui peuvent améliorer les performances des sportifs.

1 Les matériaux biosourcés : l'exemple des polyamides

Dans le domaine des textiles, on recherche des matériaux



Figure 1

Les matériaux chez Arkema.



Figure 2

Les polymères biosourcés de haute performance de Arkema.

légers, résistants dans la durée et efficaces à des températures très basses jusqu'à -20° , -30° et même -40°C .

Arkema a une expérience de plus de 75 ans dans la fabrication des biomatériaux et fabrique des polyamides² de spécialité qui possèdent ces performances, et ce à partir de l'huile de ricin, une matière première remarquable (Figure 2).

2. Famille de polymères de synthèse.

Ces polymères³ de haute performance sont rassemblés sous l'appellation « ABC » : « A » pour le niveau « Avancé » de leur performance, « B » pour « Biosourcé » et « C » pour « Circularité », car ils sont recyclables.

Leur recyclage est également un point important : Arkema a lancé en 2019 Virtucycle®, un programme de régénération de polymères haute performance, et a intégré depuis 2021 une société de recyclage en Italie, pour créer des boucles de recyclage vertueuses avec ses clients.

L'huile de ricin : de la plante au polymère

L'huile de ricin est extraite d'une plante qui grandit en Inde, dans le Gujarat, mais aussi à Madagascar et en Afrique du Sud. Environ 700 000 fermes indiennes cultivent cette plante, dans une région dont la surface avoisine celle de l'Allemagne et de la France réunies. La plante de ricin produit des graines qui, broyées, fournissent 45 % d'huile (Figure 3), le reste (appelé « résidu sec ») peut être réutilisé comme engrais naturel.

Ces plantes de ricin sont cultivées dans des régions arides et chaudes (au moins 20°C) ou rien d'autre ne pousse réellement.

Depuis 2016, dans le cadre du programme « Pragati » (« progrès » en hindi), Arkema travaille en partenariat avec

3. Un polymère est une longue chaîne moléculaire issue de la répétition d'un ou plusieurs motifs élémentaires, le(s) monomère(s).

les agriculteurs de la région du Gujarat pour les aider à améliorer les rendements et la rentabilité de leurs plantations. Un des atouts de cette matière première naturelle est qu'elle n'entre pas en compétition avec la chaîne alimentaire (**Figure 4**).

Le savoir-faire unique d'Arkema réside dans la production du monomère «amino 11» (l'acide 11-aminoundécanoïque) à partir de l'huile de ricin. Pour cela, Arkema possède deux unités : l'huile est acheminée à Marseille et Singapour où Arkema produit ce monomère qui est ensuite envoyé dans d'autres usines (en France, aux États-Unis, en Chine, à Singapour) pour être polymérisé en polyamide 11 (**Figure 5**) connu commercialement sous le nom de RILSAN®.

Ce monomère est la brique de construction élémentaire à la base des différents matériaux de la famille du polyamide 11.

Les matériaux biosourcés avancés de la famille du polyamide 11 sont très légers, très solides, durables et recyclables. Ils peuvent non seulement être injectés et extrudés, mais aussi transformés pour faire à peu près tout : films, filaments, revêtements, poudre, voire être imprimés en 3D.

La famille des polyamides est très large et comprend de nombreux types de polymères différents. Le polyamide 11 entre dans la catégorie des polyamides dits «à longue chaîne» en opposition aux polyamides «à courte chaîne» comme le polyamide 6. Cette différence dans la structure de la chaîne polymère apporte

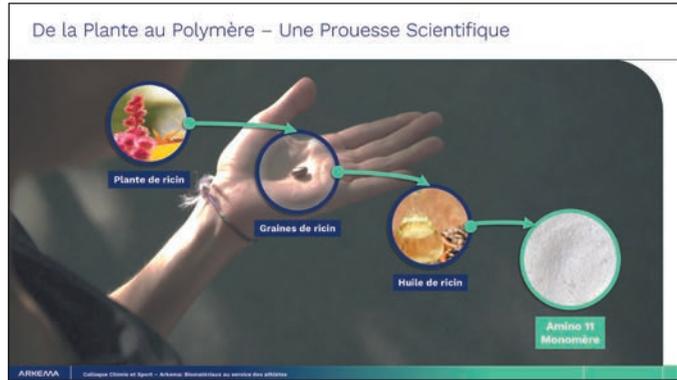


Figure 3

Schéma de la transformation de l'huile de ricin en monomère.



Figure 4

Avantages de la graine de ricin.

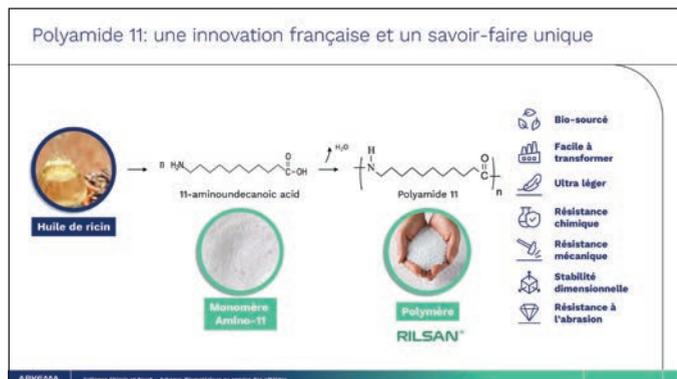


Figure 5

Schéma de la fabrication du polyamide 11 RILSAN®.

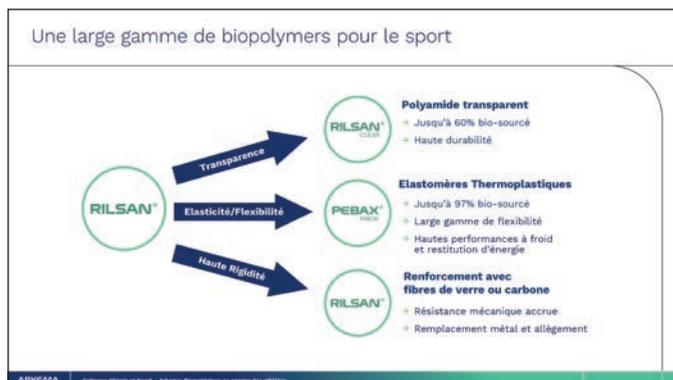


Figure 6

Gamme de polyamides proposés par Arkema dérivés du polyamide 11 RILSAN®.

légèreté et performance, ce dont les athlètes ont besoin pour leurs vêtements, leurs chaussures et tous leurs équipements.

Ainsi, le polyamide 11 est 20 % plus léger que le polyester pour les fibres textiles.

La résistance mécanique ainsi que la résistance à l'abrasion sont excellentes.

Ce polyamide 11 est semi-cristallin⁴, mais à partir de ce matériau semi-cristallin, d'autres déclinaisons de matériaux sont possibles (Figure 6) :

- Le polyamide amorphe⁵ RILSAN® Clear est un polyamide 11 transparent très utilisé dans la lunetterie (lunettes de sport, vélo...).
- Les élastomères thermo-plastiques⁶ PEBAX® sont comparables au TPU (polyuréthane thermo-plastique). Le problème

4. Se dit du matériau possédant des zones cristallines et des zones amorphes.

5. Qui n'a pas de forme cristallisée.

6. Matériau caoutchouteux malléable à la chaleur. Nom générique : TPE.

du TPU est qu'il est lourd et qu'il absorbe beaucoup d'eau, alors que nos matériaux ne requièrent pas beaucoup d'eau, qu'ils sont biosourcés et beaucoup plus légers.

La matière PEBAX® sera très probablement championne olympique grâce à ses performances au niveau des chaussures.

Les applications du polyamide 11 RILSAN® peuvent être augmentées par renforcement avec des fibres de carbone ou de verre. Arkema travaille également sur le recyclage de ce type de matériau.

2 Les matériaux au service de l'innovation pour le sport

Les chercheurs d'Arkema « jouent » avec la chimie pour modifier les polymères comme le polyamide 11 pour obtenir de la transparence, des polymères plus élastiques ou les transformer en insérant des fibres de carbone ou de verre pour les renforcer. Tout cela permet de répondre à plusieurs types de besoins :

- besoins spécifiques dans le sport ;
- besoins concernant les procédés qui consistent à transformer la matière ;
- besoins au niveau des applications.

2.1. Les applications du polyamide 11

Une large gamme d'équipements de performance pour le sport est fabriquée à partir du polyamide 11 biosourcé (Figure 7).

Le dessus des skis est fait en polyamide 11 pour apporter de la résistance au froid, aux impacts et aux rayures, ce qui permet d'augmenter la durabilité des skis. Le polyamide 11 peut aussi être utilisé en impression 3D pour fabriquer, par exemple, un casque en structure «nid d'abeille» (Figure 7, à gauche). Des procédés plus classiques comme l'injection peuvent être utilisés pour fabriquer des semelles de foot, de rugby ou de baseball qui sont renforcées avec le polymère qui, lui-même, peut être renforcé avec des fibres de verre ou de carbone. Le polyamide 11 RILSAN® est aussi très présent dans le domaine du vélo que ce soit pour les chaussures ou pour les pièces ou accessoires (Figure 7, au centre). Tout cela répond à un besoin spécifique de performance et, selon les applications, on va rechercher de la légèreté, de la durabilité ou du dynamisme, et c'est ce qui fait la spécialité de ces matériaux.

2.2. Les applications des élastomères thermoplastiques PEBAX®

Le matériau PEBAX® est connu pour son retour d'énergie exceptionnel. Cette propriété est mise à profit dans les chaussures de sport (Figure 8) : à chaque foulée sur le sol, une partie de l'énergie apportée par le coureur sur la chaussure est perdue et une autre partie est restituée vers l'athlète. Avec le matériau PEBAX®, 80 %, voire plus, de l'énergie est restituée à l'athlète, là où les matériaux que l'on trouve dans



Figure 7

Les différentes applications dans le domaine du sport du polyamide 11, aussi appelé «RILSAN®».



Figure 8

Exemples d'applications des élastomères thermoplastiques PEBAX® pour les chaussures de sport.

les chaussures de ville, par exemple, n'en restituent que 40 à 50 %. Cette différence intéresse particulièrement les athlètes car elle leur permet d'améliorer leurs performances. Le PEBAX® est utilisé par la marque Décathlon notamment sous forme de mousse dans son modèle Kiprun KD900X : la chaussure restitue un maximum d'énergie tout en étant plus légère.



Figure 9

Chaussures de ski de randonnée de la marque Scarpa utilisant la matière PEBA^X.



Figure 10

Utilisation des polyamides transparents dans le domaine du ski.

Dans le domaine du ski, le PEBA^X apporte de la légèreté, ce qui est essentiel pour des chaussures de randonnée, comme le montre l'exemple de la marque Scarpa (Figure 9).

On observe une différence de 500 g entre une chaussure faite en thermoplastique élastomère et une autre faite à partir de PEBA^X. Cette différence, selon la distance parcourue dans la neige, est considérable pour l'utilisateur.

Une autre caractéristique notable avec le PEBA^X est la stabilité dans les performances, que l'on coure à température ambiante ou dans la neige.

2.3. Les polyamides transparents appliqués au ski

Le polyamide transparent RILSAN[®] Clear est utilisé, par exemple, dans les lunettes et masques de ski de la marque Vuarnet (Figure 10).

2.4. L'avenir de l'innovation dans le domaine de la chimie

Fabriquer des matériaux performants, trouver de nouveaux matériaux biosourcés pour avoir une empreinte carbone très basse, cela n'est pas suffisant. L'innovation en chimie, c'est comme dans le sport : on cherche toujours à faire mieux que l'on a déjà fait, mais aussi par rapport à ses concurrents.

L'une des problématiques actuelles est la fin de vie des produits et ce que l'on en fait après utilisation. Avec la marque suisse On Running, Arkema a développé une chaussure de performance totalement recyclable. Arkema va recycler ces chaussures, entièrement réalisées à partir de ses matériaux «ABC» (Figure 11), que ce soit la tige, le dessus de la chaussure, les lacets, la languette, la mousse, les plaques de renfort ou les semelles d'usure. Tout étant fait dans la même famille de matériaux, la chaussure peut être entièrement recyclée.

Dans la vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=9P-EK--woMA>, l'entreprise suisse On Running, fondée en 2010, spécialisée dans les chaussures de sport, explique comment faire des chaussures à partir de graines de ricin.



Figure 11

Une chaussure entièrement recyclable conçue avec des matériaux Arkema par la marque On Running.

Conclusion : l'avenir des chaussures biosourcées

Aujourd'hui, des plastiques sont encore, dans leur grande majorité, fabriqués à partir de ressources fossiles bon marché. Il y a quelques années, Arkema a présenté la famille des matériaux PEBAX® à On Running, et plus particulièrement le polyamide 11 RILSAN®. Existant depuis de nombreuses années, c'est un polymère de haute qualité, à de nombreux égards. Ce qui le rend unique, c'est le fait qu'il soit fabriqué à partir d'huile de ricin. D'un point de vue chimique, cette huile sert de matière première pour fabriquer le monomère, élément de base du plastique. Ce monomère est ensuite polymérisé en un polymère, qui est le matériau final, utilisable dans les chaussures. On Running utilise depuis plusieurs années le polyamide 11 dans les «*speedboards*», par exemple. Une «*speedboard*» est une plaque insérée dans la semelle intermédiaire, qui capture l'énergie pendant l'amorti pour la restituer pendant la relance, ce qui procure une sensation de course explosive. Désormais, On Running veut montrer que ce matériau peut être utilisé de manières

différentes, en utilisant d'autres propriétés. Les techniciens de l'entreprise ont réussi à le transformer en un fil très fin et résistant, qui a été tissé en un tissu extrêmement léger et respirant. Cloudneo est la première chaussure de course de performance entièrement fabriquée à partir de matériaux biosourcés et complètement recyclable. C'est-à-dire que la chaussure peut être recyclée d'un seul tenant et redevenir un matériau utilisable dans de nouvelles chaussures.

Plus de la moitié des 24 milliards de chaussures fabriquées chaque année contiennent du plastique ou du caoutchouc. Pour que l'industrie change, il faut que les consommateurs demandent aux marques plus de matériaux biosourcés. Une demande croissante fera baisser les prix et les produits seront accessibles à un plus grand nombre de personnes.

Partie 3

Santé et sport

Détection du dopage : challenges et perspectives

Michel Audran est Professeur émérite à l'Université de Montpellier, laboratoire de Biophysique, UFR de pharmacie, Université Montpellier-I.

Sports et activités physiques sont largement encouragés par les autorités sanitaires pour leurs bienfaits sur la santé et la qualité de vie. Le sport peut cependant présenter quelques aspects négatifs, dont le recours à l'usage de certaines substances ou méthodes qui permettent d'accroître artificiellement les capacités physiques et psychologiques. On parlera de « dopage » si et seulement si ces substances et/ou méthodes figurent sur la Liste des interdictions publiée chaque année par l'Agence Mondiale Antidopage (AMA).

Le dopage est contraire aux valeurs du sport. En outre, il met en danger la santé de

millions de jeunes athlètes dans le monde. Les contrôles antidopage constituent l'un des deux piliers, avec l'éducation, de la lutte antidopage.

1 Les contrôles antidopage : principe

Ces contrôles consistent à rechercher la présence de substances interdites et/ou de leurs métabolites ou marqueurs dans des échantillons biologiques (urine, plasma/sérum, goutte de sang séché) fournis par les sportifs et prélevés en compétition ou hors compétition.

Lors d'un prélèvement urinaire, l'urine est répartie dans deux flacons A et B ; lors d'un

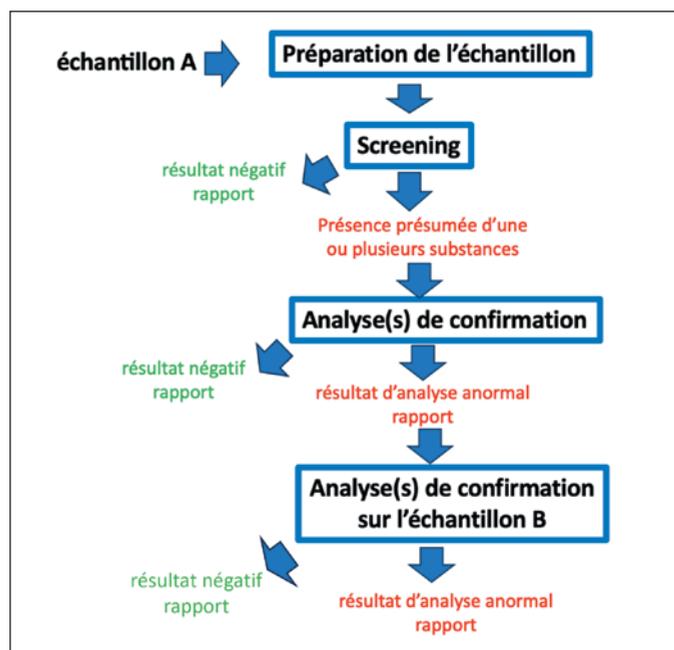


Figure 1

Déroulement des contrôles antidopage.

prélèvement sanguin, deux tubes A et B sont prélevés. Les échantillons, anonymisés (le laboratoire ne connaît jamais l'identité des personnes sur lesquelles les échantillons ont été prélevés), sont envoyés pour analyse, à un laboratoire antidopage. Il en existe une trentaine environ dans le monde. Ils possèdent une double accréditation :

- Accréditation ISO/IEC-17025, norme internationale qui garantit que le personnel, les instruments et les locaux sont aptes à la réalisation des analyses et que l'on peut avoir confiance dans les résultats rendus par le laboratoire.
- Accréditation AMA, plus contraignante, qui implique que le laboratoire travaille selon le « Standard International pour les Laboratoires » (SIL)

édité par l'AMA et dont les règles imposent entre autres un « niveau minimal de performances requises » et la participation au « programme d'évaluation externe de la qualité » de l'AMA. Ce dernier consiste en des tests en simple aveugle (le laboratoire sait que les échantillons sont envoyés par l'AMA) et en double aveugle (le laboratoire ne sait pas que les échantillons sont envoyés par l'AMA) tout au long de l'année.

Les contrôles sont effectués uniquement sur l'échantillon A, l'échantillon B étant réservé à une contre-expertise en cas de contestation de résultats positifs par l'athlète.

Les analyses sont réalisées en deux temps : une procédure d'analyse initiale ou *screening* destinée à rechercher la présence de l'ensemble des substances interdites, suivie d'une analyse de confirmation en cas de soupçons de présence d'une ou plusieurs de ces substances (**Figure 1**). Le laboratoire doit fournir des résultats analytiques avec une interprétation sans équivoque et éviter de faire de « faux positifs ».

Qu'il s'agisse du *screening* ou de l'analyse de confirmation, un contrôle se déroule en trois étapes : préparation de l'échantillon, dont le but est d'enlever un maximum de substances interférentes, d'extraire et (généralement) de concentrer l'échantillon ; séparation des divers composés contenus dans l'échantillon et, pour terminer, leur identification.

Une des difficultés des contrôles antidopage réside

dans le nombre et la variété des substances à détecter. La Liste des interdictions comporte environ 300 substances auxquelles il faut ajouter leurs métabolites, quelques composés non interdits mais ayant un métabolite commun avec des substances interdites et des substances permettant de s'assurer de la bonne conservation de l'urine, soit plus de 700 molécules au total. Ces composés sont des médicaments ou candidats médicaments, appartenant à des catégories aussi différentes que celles d'agents anabolisants, d'agents stimulant l'érythropoïèse, d'agents modifiant les activités de l'activine et de la myostatine, par exemple. Ces substances, qui vont des composés gazeux (le xénon) et inorganiques (le cobalt) et autres composés de faible masse moléculaire, aux molécules organiques protéiques de masse moléculaire élevée, possèdent des propriétés physicochimiques (polarité, propriétés acidobasiques) très diverses. Ces caractéristiques sont de grande importance dans la préparation de l'échantillon et la séparation et l'identification des composés.

Une deuxième difficulté est le faible volume d'échantillon, environ 45 ml, sur lequel le laboratoire doit travailler, sachant qu'une recherche d'érythropoïétine (EPO) et/ou de ses analogues, ou encore la confirmation de l'apport exogène de stéroïdes endogènes, peut nécessiter plus de 10 ml d'urine.

Le fait que ces analyses doivent être effectuées dans des temps relativement courts, en général 10 jours ouvrables,

parfois en 24 ou 48 heures lors de grandes compétitions, et à un coût raisonnable, constitue un challenge supplémentaire.

On comprend donc que le dépistage de ces substances ne peut pas être « optimisé » pour chacune d'entre elles et qu'il faut trouver des méthodes de préparation de l'échantillon, de séparation des composés et de leur identification, aussi génériques que possible, mais en respectant les minimums de performances requis par l'AMA.

L'apparition au début des années 2000, à côté du couplage chromatographie gazeuse-spectrométrie de masse (GC-MS), d'instruments couplant la chromatographie liquide à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS), s'est révélée révolutionnaire pour le dépistage antidopage. Cette stratégie analytique a permis de développer et d'appliquer des méthodes de tests multi-analytes qui rendent possible la détection de plusieurs centaines de substances en une seule injection (plus de 200 par GC-MS/MS, plus de 500 par LC-MS/MS) et constituent environ 95 % des analyses. Les hormones de masse moléculaire élevée sont, quant à elles, recherchées par immunodosages ou par électrophorèse, et le dépistage du dopage génétique par PCR (*Figure 2*).

La Liste des interdictions évoluant chaque année, les laboratoires doivent régulièrement incorporer de nouvelles molécules dans leur recherche (*Figure 3*), si possible dans les protocoles existants. Cela implique des modifications

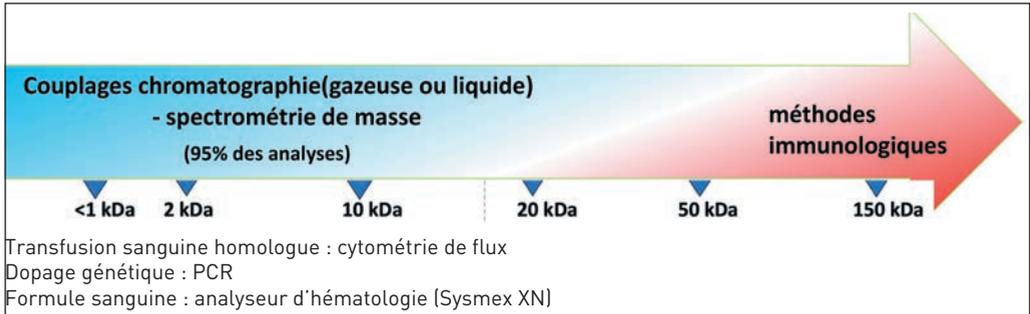


Figure 2

Méthodes analytiques pour les contrôles antidopage.

D'après *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 205 (2021).

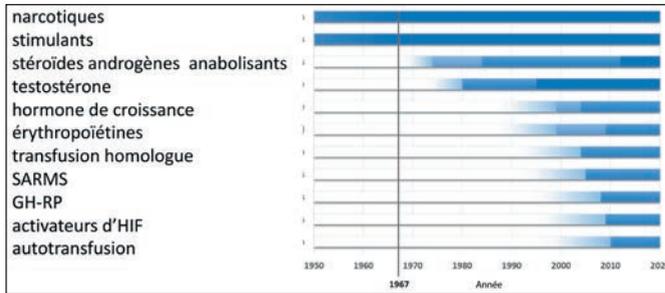


Figure 3

Bref aperçu de la mise en œuvre et du développement des méthodes de test antidopage pour certaines substances interdites et des méthodes de dopage.

régulières de ces protocoles et leur revalidation, ce qui constitue un challenge supplémentaire.

2 Les contrôles antidopage : limites

Malgré les efforts des analyses antidopage et l'augmentation continue de la sensibilité des techniques de détection, il existe encore des substances et des méthodes dopantes qui sont difficilement détectables par les tests antidopage :

- hormones peptidiques à demi-vie courte (desmopressine et

analogues et leurs facteurs de libération) ;

- stéroïdes androgènes anabolisants (SAA) endogènes administrés de façon exogène (type testostérone) ;

- protéines et peptides recombinants dont les structures moléculaires sont identiques aux endogènes (insuline, IGF-1) ;

- microdoses de tout ce qui précède ;

- transfusions sanguines autologues (également en association avec des microdoses d'agents stimulant l'érythropoïèse).

Il est possible de différencier stéroïdes endogènes et stéroïdes endogènes administrés de façon exogène grâce au couplage chromatographie gazeuse-combustion-spectrométrie de masse de rapport isotopique (GC-C-IRMS). Il existe en effet une différence de composition en ^{13}C entre ces deux classes de stéroïdes, les stéroïdes endogènes étant plus riches en ^{13}C , mais cette analyse est longue (2-3 jours) et nécessite un volume

conséquent d'urine ; elle est donc réservée à la confirmation. En outre, elle n'est pas applicable à l'insuline, l'IGF-1 ou encore l'AICAR.

Les analyses antidopage sont basées sur une approche ciblée, c'est-à-dire sur la recherche de substances dont on sait qu'elles sont utilisées dans le dopage. Elles ne permettent pas la détection de substances et/ou d'agents masquants encore inconnus, ni celle des « *designer drugs* », substances ressemblant à des composés connus, mais dont la structure a été volontairement légèrement modifiée pour échapper aux contrôles. Généralement, on apprend l'usage de ces substances par des saisies douanières, des dénonciations ou encore par une veille sur Internet.

3 Les contrôles antidopage : solutions actuelles

3.1. La spectrométrie de masse haute résolution

Pour tenter de pallier l'absence de détection de substances non ciblées, les laboratoires utilisent, pour le *screening*, des couplages chromatographie-spectrométrie de masse haute résolution (GC-HRMS ; LC-HRMS). La HRMS offre une précision et une sensibilité inégalées, ce qui en fait un outil précieux pour les analyses complexes. Ces appareils permettent l'acquisition de données non ciblées qui sont stockées et peuvent être utilisées pour la détection rétrospective de substances inconnues au moment de l'analyse des échantillons.

3.2. La conservation des échantillons pendant une période de dix ans

Lors des grandes compétitions (Jeux olympiques, championnats du monde, grands tours cyclistes, etc.), les échantillons prélevés pour les contrôles antidopage sont conservés pendant dix ans. Les méthodes de détection étant constamment améliorées et actualisées, cette possibilité de stockage offre la possibilité de refaire des tests lorsque des informations sur de nouveaux agents dopants ou de nouvelles méthodes de détection sont disponibles. La nouvelle analyse des échantillons recueillis à Pékin 2008 et à Londres 2012 a, jusqu'à présent, permis de détecter plus de 130 violations des règles antidopage, ce qui souligne clairement l'efficacité d'un tel programme pour assurer une détection plus efficace tout en ayant un effet dissuasif.

3.3. Le passeport biologique (PBA) de l'athlète

Le PBA a été introduit pour compléter l'approche antidopage directe en apportant une preuve indirecte de l'utilisation possible de substances ou de méthodes interdites.

Son principe est basé sur le suivi au fil du temps de variables biologiques spécifiques (biomarqueurs) qui sont à la fois scientifiquement et légalement robustes, et qui indiquent l'utilisation d'une substance ou encore d'une méthode interdite. De la même manière que les

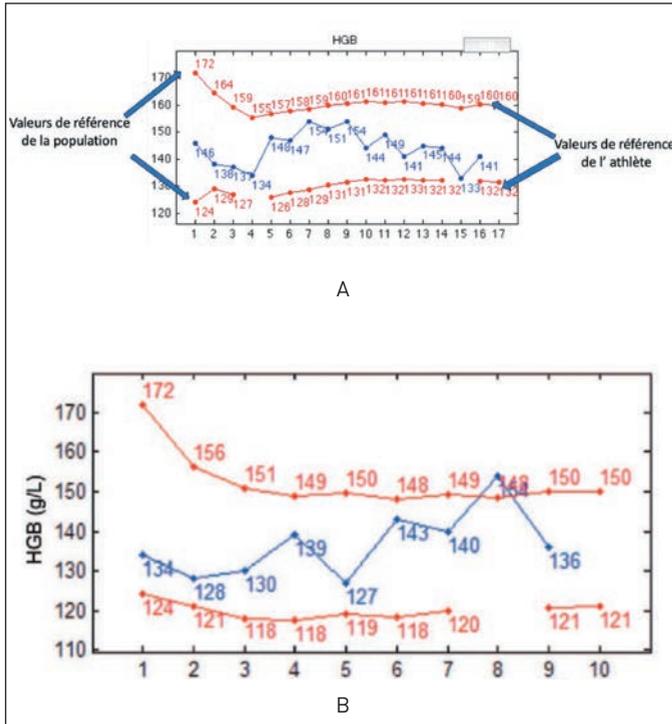


Figure 4

A. Visualisation de l'ajustement du domaine de valeurs normales de population, ici de l'hémoglobine, au domaine de valeurs normales de l'athlète.

B. L'échantillon 8, pourtant dans le domaine de valeurs normales de la population, semble anormal pour l'athlète et sera soumis à l'analyse d'un expert.

biomarqueurs d'une maladie visent à détecter son empreinte biologique, les biomarqueurs du dopage sont utilisés pour détecter l'empreinte biologique du dopage.

Le PBA et ses directives opérationnelles ont été mis en place par l'AMA en 2009. À cette date, il se composait uniquement du module hématologique. En 2014, le module stéroïdien a été incorporé pour surveiller les paramètres stéroïdiens. Le module endocrinologique, introduit en 2023, se concentre principalement sur

la surveillance des facteurs de croissance, tels que l'hormone de croissance (GH), le facteur de croissance 1 ressemblant à l'insuline (IGF-1) et les substances permettant la libération de la GH.

Chaque variable biologique possède une variabilité naturelle inhérente qui doit être distinguée des effets du dopage. Cette variabilité a une composante biologique et une composante analytique, la première étant éventuellement affectée par l'activité physique de l'athlète. L'enjeu clé de la détection indirecte du dopage est donc la distinction entre variabilité naturelle et variations provoquées par le dopage. Pour éliminer une grande partie de la variabilité biologique, les marqueurs indirects du dopage sont évalués de manière longitudinale et le sportif devient sa propre référence. Lorsqu'un premier échantillon est collecté, des seuils supérieurs et inférieurs sont déterminés avec des références moyennes basées sur la population. Ces limites individuelles sont ensuite adaptées progressivement en fonction des valeurs de chaque athlète, au fur et à mesure que des échantillons supplémentaires sont prélevés (Figure 4).

Le PBA a prouvé son efficacité, et pas seulement par son effet dissuasif, même si les matrices utilisées pour la surveillance longitudinale (urine et sang) sont soumises à de nombreux facteurs confondants intrinsèques (par exemple génétiques) et extrinsèques (conditions environnementales).

4 Les contrôles antidopage : les perspectives

4.1. Anticiper le détournement de nouvelles substances

Les études sur le protéome et le peptidome humain ont ouvert de nouvelles options thérapeutiques. Le développement d'anticorps monoclonaux, de protéines thérapeutiques et de médicaments peptidiques a fait de grands progrès au cours de la dernière décennie grâce aux nouvelles technologies de production. Une grande variété de peptides naturels et modifiés, couvrant de multiples domaines thérapeutiques, a été obtenue. Les thérapies protéiques/peptides approuvées et expérimentales comprennent plusieurs candidats médicaments dotés de propriétés pouvant potentiellement améliorer les performances sportives. Les laboratoires doivent assurer une veille scientifique de façon à repérer ces candidats médicaments susceptibles d'être détournés de leur usage thérapeutique à des fins de dopage et mettre en place des tests permettant leur dépistage. L'AMA a su sensibiliser l'industrie pharmaceutique à ce problème de détournement de substances et, bien souvent, les laboratoires peuvent avoir accès à ces nouvelles molécules encore en étude préclinique, et mettre au point des tests de dépistage avant leur mise sur le marché. Un bon exemple est celui des modulateurs des récepteurs aux androgènes (SARMs), substances anabolisantes dont aucune n'a à ce jour obtenu

d'autorisation de mise sur le marché, mais qui sont régulièrement détectées lors des contrôles antidopage.

4.2. Améliorer la détection par le dépistage ciblé

Cette amélioration peut se faire par une meilleure connaissance du métabolisme des substances. La découverte de métabolites en très faible concentration, mais demeurant plus longtemps dans l'organisme (métabolites long terme), a permis ces dernières années d'augmenter la fenêtre de détection de certains SAA, la faisant passer de quelques jours à une ou plusieurs semaines, selon la substance.

L'amélioration de la sensibilité et de la spécificité des analyses reste un objectif majeur des laboratoires antidopage. L'utilisation d'anciennes méthodes améliorées pourrait permettre d'accroître la sensibilité et la spécificité de la détection, par exemple :

- la chromatographie en phase supercritique couplée à la spectrométrie de masse en tandem (SCF-MS/MS) ;
- ou de nouvelles méthodes telles que le couplage chromatographie liquide – mobilité ionique – à la spectrométrie de masse haute résolution masse précise (LC-IM-HRAM/MS), au pouvoir de résolution élevé et qui permet la détection d'analyses à de faibles concentrations et l'identification précise des composants, même s'ils ont une masse moléculaire similaire.

Cependant, l'augmentation de la sensibilité analytique

conduit aussi à l'augmentation de la mise en évidence de dopages par inadvertance à l'instar des contaminations par les aliments (Clenbutérol et autres promoteurs de croissance dans les viandes, Clomifène dans les œufs, Higénamine dans certaines plantes) ou encore par contact par la peau (SAA), la salive (SAA), la cocaïne ou le liquide séminal (SAA, anti-œstrogènes).

4.3. Développer des méthodes analytiques

Le développement de méthodes analytiques permet en effet de répondre à un large éventail de substances sans limiter l'objectif à l'avance (analyses non ciblées).

La méthode de dépistage ciblé actuellement utilisée dans le contrôle du dopage nécessite des modifications fréquentes (ajout de substances supplémentaires à la liste, nouveaux

métabolites) et de posséder une référence pour mettre en place le *screening*. Des méthodes non ciblées qui permettent d'identifier toutes les substances d'une même famille – par exemple, rechercher la présence de SAA en mesurant l'activité androgénique d'un échantillon – ont été proposées. La possibilité d'identifier toutes les substances présentes dans un échantillon, y compris celles dont on ne soupçonne même pas l'existence, est l'objectif à atteindre : l'évolution récente de la spectrographie de masse à haute résolution et la mise au point d'algorithmes d'analyse des données de masse pourraient constituer une avancée significative dans ce domaine.

4.4. Les méthodes « omiques »

Les substances médicamenteuses agissent sur nos gènes, nos protéines, et l'ensemble de notre métabolisme ou métabolome¹ (Figure 5).

Les effets de ces actions – activation ou répression du fonctionnement des gènes, augmentation ou diminution de la production de certaines protéines, ou de certains métabolites – peuvent être étudiés respectivement par la transcriptomique, la protéomique et la métabolomique.

Leur usage, et plus particulièrement celui de la métabolomique, a suscité beaucoup d'espoir quant à la découverte

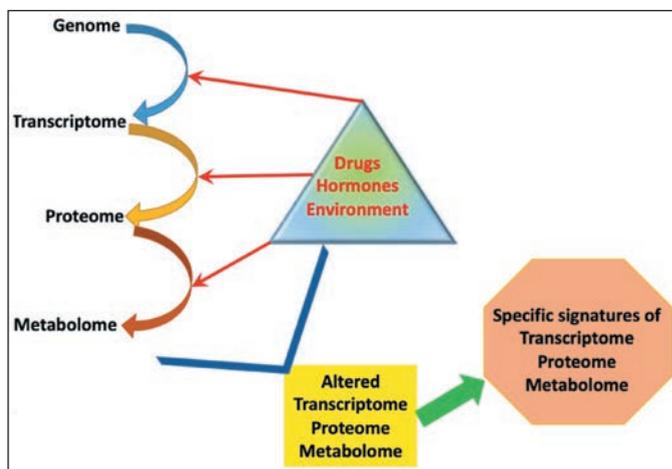


Figure 5

Les méthodes « omiques » (d'après Current Pharmaceutical Analysis, 2018, vol. 14, n° 3).

1. Ensemble de petites molécules telles que acides aminés, sucres, acides gras, triglycérides, hormones, vitamines...

de nouveaux biomarqueurs du dopage, mais ces méthodes manquent encore de spécificité pour différencier les effets produits par le recours à des substances/méthodes dopantes de ceux dus à d'autres causes, notamment environnementales (mode et lieu de vie, alimentation, exercice physique...).

4.5. Le dopage génétique

Le dopage génétique fait référence à l'utilisation de techniques de génie génétique pour améliorer les performances sportives. Il existe plusieurs méthodes, et plusieurs types de dopage génétique, chacune présentant ses propres avantages et inconvénients :

- La thérapie génique implique l'introduction d'une copie saine d'un gène dans les cellules d'une personne.
- La modification épigénétique implique de modifier la façon dont les gènes sont exprimés sans changer la séquence d'ADN réelle. Par exemple, en modifiant les étiquettes chimiques (telles que les groupes méthyle) attachées à l'ADN, il serait possible d'activer ou de désactiver des gènes, ce qui peut affecter les performances sportives.
- L'édition génétique implique l'utilisation d'outils moléculaires tels que CRISPR/Cas9 pour modifier avec précision la séquence d'ADN d'un organisme. L'édition génétique pourrait être utilisée pour améliorer les performances sportives en introduisant des mutations bénéfiques ou en supprimant celles qui sont nuisibles.

Les cibles du dopage génétique sont les gènes qui régulent la performance sportive ou l'apparence physique. Ceux-ci incluent des gènes qui contrôlent la croissance musculaire (ex. : hormone de croissance, IGF-1, FST, MSTN), le métabolisme de l'oxygène et l'endurance (ex. : EPO, VEGF). Le dopage génétique vise à introduire ou à modifier ces gènes cibles pour améliorer les performances sportives au-delà des limites normales. Le transfert de séquences d'ADN transgénique peut être réalisé à l'aide de diverses stratégies, notamment l'utilisation de systèmes de vecteurs viraux recombinants (tels que les systèmes adénoviraux ou viraux adénoassociés, AAV) ou de vecteurs non viraux (tels que les plasmides bactériens ou les ADN en minicercle). Bien que les vecteurs viraux restent les systèmes de vecteurs de thérapie génique les plus couramment utilisés en raison de leur efficacité de transduction plus élevée et de leur expression plus stable, les plasmides, dont la « construction » est plus simple, sont toujours utilisés dans un nombre important d'essais cliniques de thérapie génique, et les thérapies géniques basées sur les plasmides sont déjà entrées sur le marché pharmaceutique. L'application pratique de la thérapie génique dans le sport devient un scénario de plus en plus probable. Fin 2003, deux produits à base de plasmides supposés contenir l'un des gènes d'EPO, l'autre des gènes d'IGF-1, et destinés à être injectés par voie intramusculaire, ont été trouvés sur Internet. Des tests

de dépistage faisant appel à la technologie PCR existent déjà, mais les laboratoires antidopage travaillent à leur amélioration : augmentation de la sensibilité, détection simultanée de plusieurs gènes en une seule analyse, réduction du temps d'analyse.

4.6. L'intelligence artificielle (IA)

Les tests de dopage génèrent de grandes quantités de données : par exemple, les échantillons de sang et d'urine prélevés en compétition et hors compétition sur de longues périodes et analysés dans des laboratoires à la recherche de traces de substances interdites

ou de méthodes d'entraînement illégales. D'autres informations relatives aux athlètes sont également recueillies : les contrôles antidopage pouvant avoir lieu n'importe où et à tout moment, les sportifs sont tenus de communiquer les informations de leur localisation, ce qui permet de situer l'athlète pour des contrôles hors compétition. Toutes ces données pourraient être introduites dans les systèmes d'IA pré-entraînés pour vérifier les signes de manipulation et cibler les tricheurs.

Malheureusement, l'IA pourrait aussi contribuer à la création de substances dopantes indétectables telles que les « *designers drugs* ».

Conclusion

Les avancées majeures dans les connaissances sur le métabolisme des médicaments, les améliorations de l'instrumentation analytique, les analyses rétrospectives, la mise en place du passeport biologique de l'athlète ont considérablement limité les possibilités d'usage de substances et de méthodes de dopage. Néanmoins, il existe toujours des substances et des méthodes qui ne sont pas ou sont difficilement détectables et, davantage que le dopage génétique, le nombre croissant de nouveaux composés et candidats médicaments susceptibles de présenter des propriétés ergogéniques et la production d'hormones et de peptides identiques aux composés endogènes continuent de représenter un défi pour les laboratoires de dépistage du dopage.

BIBLIOGRAPHIE POUR APPROFONDIR

Rabin, O., Corazza, O. (eds). *Emerging Drugs in Sport*, Springer, 2022.

Lu, Y., Yan, J., Ou, G., Fu, L. A Review of Recent Progress in Drug Doping and Gene Doping Control Analysis. *Molecules*. 2023; 28: 5483.

<https://doi.org/10.3390/molecules28145483>

Thomas, A., Thevis, M. Recent advances in mass spectrometry for the detection of doping. *Expert Review of Proteomics*. 2024.

<https://doi.org/10.1080/14789450.2024.2305432>

Thevis, M., Walpurgis, K., Thomas, A. Analytical Approaches in Human Sports Drug Testing: Recent Advances, Challenges, and Solutions. *Anal Chem*. 2020 Jan 7;92(1):506-523. doi: 10.1021/acs.analchem.9b04639.2020 jan 7;92(1)

Thevis, M. Sports Drug Testing. Section Editor: Mario Thevis. https://fis-db.dshs-koeln.de/ws/portalfiles/portal/14210476/Chapter_4.pdf

Le passeport biologique de l'athlète. *L'actualité chimique*, n° 492, février 2024.

Varlet, E., Audran, M. Sport et dopage. *Revue francophone des laboratoires*, vol. 2022, n° 547, décembre 2022.

Liste des Interdictions : <http://wada-ama.org>

Sport et nutrition : les suppléments, utiles ou pratiques à risque ?

Madame Margaritis est professeur des universités en physiologie. Elle a notamment publié sur des réponses adaptatives à l'entraînement et aux environnements extrêmes modulés par les apports alimentaires. Elle est détachée auprès de l'Agence Nationale de Sécurité Alimentaire (ANSES), en qualité d'adjointe au directeur de l'évaluation des risques. Elle-même est très engagée dans les sports de montagne et à haute altitude. Elle a été directrice de la Faculté des Sciences du Sport à l'Université de Nice-Sophia Antipolis. Elle a présidé des comités AFNOR¹. Elle a participé à la rédaction de normes européennes dans la prévention du dopage, et sur les compléments alimentaires et les denrées alimentaires destinées aux sportifs (2021).

Introduction

Les compléments alimentaires sont des «*denrées alimentaires dont le but est de **compléter le régime alimentaire normal** et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un **effet nutritionnel ou physiologique**, utilisés seuls ou combinés, commercialisés sous forme de **doses**, à savoir les formes de présentation telles que les*

*gélules, les pastilles, les comprimés, les pilules et autres formes similaires, ainsi que les sachets de poudre, les ampoules de liquide, les flacons munis d'un compte-gouttes et les autres formes analogues de préparations liquides ou en poudre **destinées à être prises en unités mesurées de faible quantité***» (décret n° 2006-352).

La définition réglementaire ci-dessus définit le complément alimentaire (CA) comme étant là pour compléter une alimentation normale. C'est assez subtil

1. Association française de normalisation.

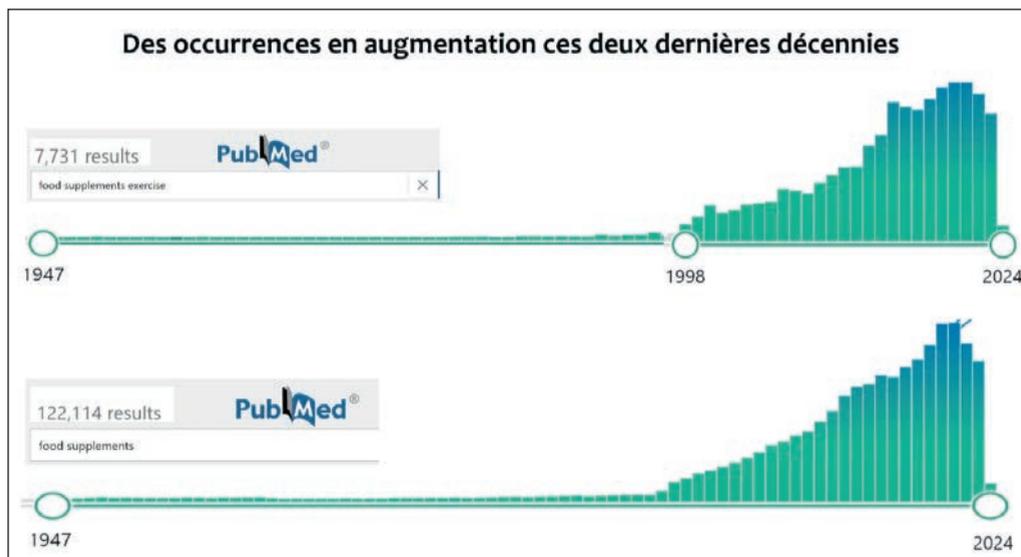


Figure 1

Évolution du nombre d'articles référencés sur PubMed² mentionnant «food supplement» («complément alimentaire») dans leur titre entre 1967 et 2024.

parce que, puisque l'alimentation est normale, pourquoi faudrait-il la compléter ?

Le CA se présente en dose, qui peut être une cuillère, une ampoule, des gélules...

Dans tous les cas, il y a le concept de quantité et d'identification de la quantité de produit nécessaire pour apporter certaines substances ou certains nutriments à des concentrations qui sont en général plus élevées que les concentrations que l'on trouve dans notre alimentation. Il est cependant bien précisé dans le décret que ces doses doivent être prises en unités mesurées de faible quantité.

2. Principal moteur de recherche de données bibliographiques de l'ensemble des domaines de spécialisation de la biologie et de la médecine.

Dans la littérature internationale, on relève une augmentation considérable, à partir des années 2000, du nombre d'articles concernant les compléments alimentaires en général («*food supplements*») ou ceux davantage destinés aux sportifs. La dynamique d'augmentation de la production scientifique à ce sujet est sensiblement la même dans les deux cas (**Figure 1**).

La **Figure 2** montre que la consommation de compléments alimentaires pour les sportifs est très liée à la nature de la discipline mais aussi au volume d'entraînement : plus le volume d'entraînement est élevé, plus la consommation est élevée, ce qui pose la question de la différence entre complément alimentaire et dopage. Il y a quand même parfois une frontière assez

étroite au niveau du produit, mais aussi en termes d'intention : il arrive que certains sportifs cherchent ce qu'on appelle l'« ergogénicité³ » par les compléments alimentaires, c'est-à-dire tout simplement à améliorer leurs performances. Or, d'après la réglementation, un complément alimentaire vient compléter l'alimentation. En France, on parle de « compléments alimentaires », et non de « suppléments ». On considère donc que ces produits servent uniquement à compléter l'alimentation.

Quand on s'intéresse à la question de l'activité physique, sous l'angle de l'exposition au stress environnemental (qui est de nature à modifier les besoins et le rôle joué par la nutrition qui va accompagner toutes les adaptations qui sont recherchées via l'entraînement sportif mais qui, avant tout, va permettre d'assurer une bonne santé), beaucoup de facteurs peuvent intervenir (Figure 3). Mais globalement, on peut considérer que le volume d'entraînement et la récupération sont les deux facteurs qui influencent sensiblement la consommation de CA.

1 S'alimenter pour être en bonne santé

Sportif ou pas... tout commence par l'équilibre alimentaire

Avant d'envisager de compléter son alimentation, toute personne, sportive ou non,

3. Fait d'améliorer la performance sportive et musculaire au-delà de ce qui serait normalement possible par le seul entraînement.

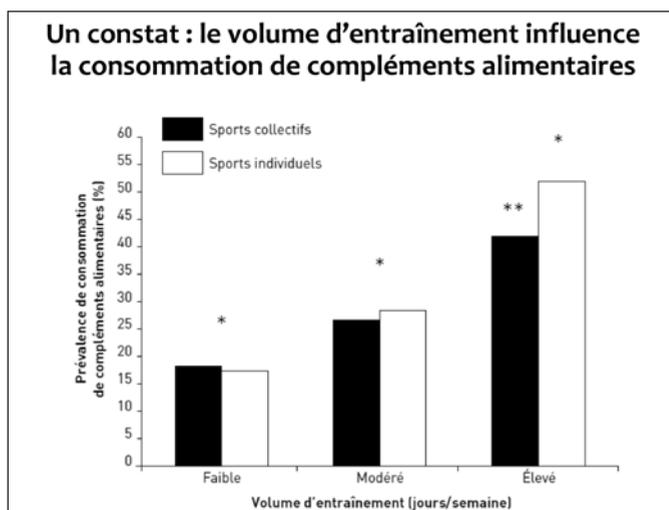


Figure 2

Comparaison de la prévalence de consommation de compléments alimentaires entre les sports collectifs et individuels pour différents volumes d'entraînement (Giannopoulou et al., 2013).



Figure 3

Les liens entre performance, santé, nutrition, entraînement et stress extérieur.

doit faire en sorte que ses apports alimentaires soient équilibrés pour lui fournir les nutriments dont elle a réellement besoin, ni plus ni moins. Plus ne servira pas à grand-chose et moins peut mettre en danger.

Fruits frais	Poissons gras
Fruits secs	Autres poissons
Fruits transformés : compotes et fruits cuits	Laits
Oléagineux	Produits laitiers frais nature
Légumes	Produits laitiers frais sucrés
Pains et produits de panification raffinés	Desserts sucrés lactés
Pains et produits de panification complets	Fromages
Féculeux raffinés	Beurre et beurres allégés
Féculeux complets	Huiles végétales riches en oméga 3 (ALA)
Produits transformés à base d'amidon sucrés/gras	Huiles végétales et margarines
Produits transformés à base d'amidon salés/gras	Sauces, crèmes fraîches et condiments
Légumineuses	Produits sucrés ou sucrés/gras
Volaille	Eau de boisson
Viande hors volaille	Boissons sucrées de type soda
Charcuterie	Jus de fruits
Oeufs	Sel

Figure 4

Les aliments qui apportent des nutriments, d'après l'ANSES⁵.

- Réduire considérablement la consommation de charcuterie (jambon, saucisson, saucisse, pâté...) < 25 g/j
- Maîtriser la consommation de viande hors volaille (boeuf, porc, agneau...) < 500 g/sem.
- Consommer moins de 1 verre /j de boissons sucrées (soda, jus de fruits)

- Renforcer la consommation de fruits et légumes en privilégiant les légumes.
- Consommer 2 X/sem du poisson dont un poisson gras (Ex: sardine, maquereau).
- Consommer régulièrement des légumineuses (Ex: lentilles, fèves ou pois chiches).
- Privilégier les produits céréaliers complets (Ex: pain, pâtes et riz complets).
- Privilégier la consommation d'huiles végétales riches en acide alpha-linolénique (Ex: huiles de colza et de noix) et huile d'olive (riche en CMV).



Figure 5

Conseils de consommation issus de la révision des repères de consommations alimentaires établie par l'ANSES.

Ayant étudié les catégories d'aliments apportant des nutriments, l'ANSES a publié en 2017 son avis relatif à la révision des repères alimentaires pour les adultes du Programme National Nutrition Santé⁴ (Figure 4). Les résultats sont disponibles sur le site de l'ANSES.

Il est naturellement nécessaire de choisir parmi ces catégories

4. Lancé en 2001, le Programme National Nutrition Santé (PNNS) a pour objectif l'amélioration de la santé par la nutrition de l'ensemble de la population. C'est un programme quinquennal gouvernemental.

d'aliments ceux qui nous plaisent et dont la combinaison va nous permettre de couvrir nos besoins nutritionnels. Nous ne devrions pas avoir besoin d'un contrôle cognitif pour couvrir nos besoins nutritionnels.

Cependant, certaines adaptations sont nécessaires selon les goûts de chacun. Une base repère valable pour tous a été établie, en identifiant des leviers à partir d'une enquête nationale qui intègre 5000 personnes représentatives de la population française. À partir d'une image générale, ont été identifiées des maladies qui sont liées soit à un excès, soit à une insuffisance de l'apport en certains nutriments. Ainsi, globalement, en France, on consomme trop de viande, trop de sodas, trop de boissons sucrées et de charcuterie (Figure 5). Réduire la consommation de ces aliments est primordial. En parallèle, il convient d'augmenter la consommation de légumineuses, de végétaux et de poisson. C'est donc une représentation très schématique qui est beaucoup plus précise et qui part d'un grammage identifié comme permettant de couvrir les besoins nutritionnels.

2 Les besoins nutritionnels du sportif

Les micronutriments

Remarques préliminaires :

- Les micronutriments sont nécessaires aux réactions fondamentales du métabolisme cellulaire. Ils participent aux activités métaboliques et enzymatiques, et sont essentiels à

la réalisation d'une fonction particulière.

- Ils comprennent des composés minéraux et organiques dont l'homme est incapable de réaliser la synthèse.
- Une insuffisance en micronutriments entraîne l'altération des fonctions biologiques incompatibles avec la santé et la performance.

Mais la question est de savoir comment les besoins nutritionnels du sportif vont être modifiés par l'activité physique. N'entrons pas dans la question des macronutriments énergétiques⁵, qui est aussi un sujet en soi parce que, généralement, quand on parle des compléments alimentaires, on parle des micronutriments⁶, des vitamines, des minéraux, et d'autres substances qui ne sont ni des vitamines ni des minéraux, mais qu'on trouve aussi dans l'alimentation et en concentration élevée dans certains compléments alimentaires.

Les micronutriments qui sont nécessaires aux réactions fondamentales de notre métabolisme sont des composés organiques dont nous avons besoin. S'ils sont en quantité insuffisante, au début, il n'y aura pas de signes cliniques, mais nous nous mettons

potentiellement en danger si l'on en manque vraiment. Un indicateur du déficit en micronutriments chez un sportif peut être la baisse de ses performances. Mais cette dernière, multifactorielle, peut avoir d'autres raisons, relatives à des aspects psychologiques ou à la charge d'entraînement, par exemple.

La Référence Nutritionnelle pour la Population (RNP) est l'apport qui couvre le besoin de presque toute la population (97,5 %) tel qu'estimé à partir des données expérimentales.

La **Figure 6** illustre la probabilité de carence en fonction de fractions ou de multiples de la RNP.

La **courbe bleu sombre** identifie le **besoin médian de la population** : c'est le besoin moyen pour une répartition normale d'un point de vue statistique. Cela signifie que la moitié de la population aura des besoins supérieurs à ce qui a été identifié.

La **courbe rouge** représente la distribution statistique des apports qui est maximale pour une RNP égale à 1. **Cette Référence Nutritionnelle pour la Population fixe une dose d'apport pour chacun des minéraux et chacune des vitamines pour la population générale.** Cette valeur a été réactualisée en France en 2017 et en 2019 pour les populations particulières (personnes âgées, femmes ménopausées, etc.). Cette valeur représente un **plancher** et concerne les personnes qui ont une activité physique globale qui correspond globalement à deux fois le métabolisme de

5. Les macronutriments regroupent les 3 groupes d'aliments destinés à fournir de l'énergie à l'organisme et à assurer ses fonctions vitales : les protéines, les glucides et les lipides.

6. Indispensables au bon fonctionnement de notre corps et de nos cellules, les micronutriments constituent l'apport non énergétique de notre alimentation. On distingue les minéraux et les vitamines.

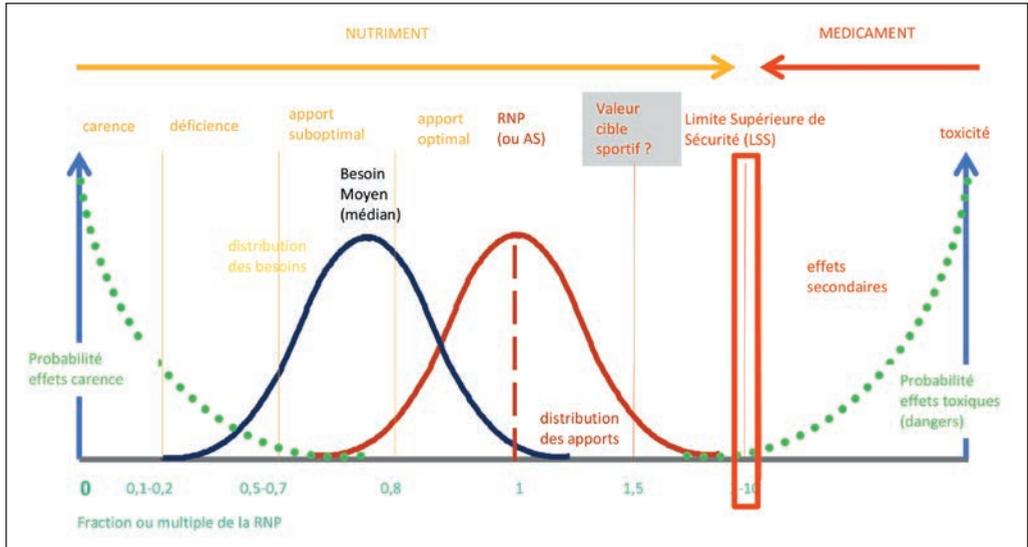


Figure 6

Probabilité des effets dus à la carence et des effets toxiques en fonction de l'apport (par rapport à la RNP).

repos, soit deux fois les MET⁷. Deux fois le métabolisme de repos, cela correspond à des besoins nutritionnels qui ne sont pas modifiés. Au-delà, à partir d'un certain niveau d'activité physique, sans parler de performance mais de dépenses énergétiques, les besoins peuvent être modifiés et on identifie une **valeur cible (Figure 6) qui sera supérieure pour le sportif**. Cette valeur est très difficile à déterminer.

En France, ces différentes valeurs, déterminées en 2003, sont en cours de réactualisation pour tous les sportifs par un groupe de travail de l'ANSES. Les résultats seront connus dans quelques mois.

7. Le MET (Metabolic Equivalent of Task) est une unité de mesure statistique de l'intensité physique. 1 MET est égal à l'énergie d'une personne assise sur une chaise au repos total.

Si on va encore au-delà et qu'on augmente la valeur en termes d'apport (en RNP), on bute sur ce que l'on appelle la « **limite supérieure de sécurité** », qui est un plafond.

De même qu'il y a un plancher en termes d'apport, il y a un plafond au-delà duquel on ne devrait pas aller parce que le nutriment peut soit devenir toxique, soit commencer à se comporter dans l'organisme comme un médicament, c'est-à-dire qu'il va avoir une action pharmacologique qui peut être très différente de son comportement quand il est un nutriment.

Un complément alimentaire qui dépasse cette limite supérieure de sécurité peut être un médicament. Il peut même être commercialisé comme un médicament. On voit ainsi la différence et la limite entre le nutriment et le médicament :

	Homme		Femme	
	ANC	Majoration pour 4,18 (1000 MJ (kcal) dépensés au delà de 9,20 (2200) MJ (kcal)	ANC	Majoration pour 4,18 (1000 MJ (kcal) dépensés au delà de 7,53 (1800) MJ (kcal)
Vitamine C (mg)	110	100	110	100
Vitamine E (mg)	12	12	12	12
β -carotène (μ g)	2400	1000	1800	1000
Riboflavine (mg)	1,6	1	1,5	1
Vitamine B6 (mg)	1,8	1	1,5	1
Folates (μ g)	330	100	300	100
Vitamine B12 (μ g)	2,4	1,5	2,4	1,5
Sélénium (μ g)	60	30	50	30
Zinc (mg)	12	1	10	1
Cuivre (mg)	2	0,6	1,5	0,6

Suilland, I., Margaritis, I., Mellin, B., Pérès, G., Richalet, J.P. & Sabatier, P.P. (2003). Sportifs et sujets à activité physique intense.

Figure 7

Références nutritionnelles spécifiques pour l'homme et la femme (ANSES).

la même molécule est un nutriment jusqu'à une certaine dose, au-delà de laquelle elle devient un médicament.

La **Figure 7** illustre des références nutritionnelles spécifiques identifiées il y a longtemps et dont les valeurs pour certaines sont à revoir. «ANC⁸» est l'ancien nom des Références Nutritionnelles pour la Population (RNP).

Prenons l'exemple de la vitamine C. La référence nutritionnelle dite «ANC» est à 110, et si l'on considère un besoin nécessaire supérieur toutes les 1000 kcal⁹ de dépenses énergétiques supplémentaires, l'accroissement est linéaire. La réalité n'est peut-être pas si linéaire que cela. C'est ce que vérifie actuellement le groupe de travail de l'ANSES.

Certains sportifs sont plus susceptibles que d'autres

8. Apports Nutritionnels Conseillés : recommandations de consommation de chaque nutriment pour un adulte type.

9. Unité de dépense énergétique.

d'être en déficit de micronutriments. Quelques exemples :

- des charges de travail élevées ;
- des courses par étapes multiples, comme des tours cyclistes ;
- la consommation de produits alimentaires à faible densité nutritionnelle.

Le déficit peut aussi s'expliquer par :

- une restriction énergétique (sports à catégories de poids) ;
- une exposition environnementale particulière (altitude, alpinisme...);
- une diminution d'absorption malgré des apports adéquats.

3 Les besoins liés à l'exercice justifient-ils l'utilisation de compléments alimentaires ?

Un sportif se définit par ses caractéristiques physiologiques (sexe, âge...), mais aussi par sa charge d'entraînement.

La **Figure 8** présente les principaux critères de catégorisation

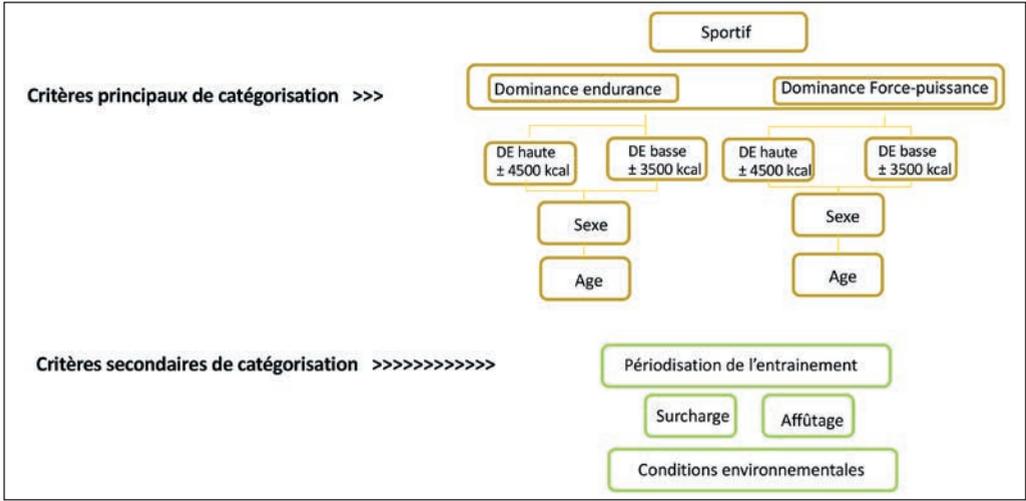


Figure 8
Principaux critères de catégorisation du sportif (ANSES).

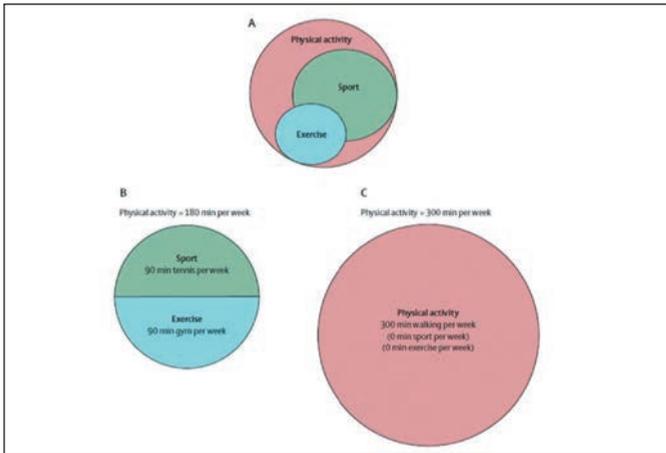


Figure 9
Sport, exercice et activité physique.
A. Domaines du sport, exercice et activité physiques.
B. Individus faisant du sport ponctuellement et sédentaires le reste du temps.
C. Individus actifs ne pratiquant pas de sport.

augmentées ? » Il n’y a peut-être pas d’effet seuil.

Le sport fait partie de ce qu’on appelle l’« activité physique » (**Figure 9**), qui a été assez bien définie en 2012. Les experts s’accordent pour dire qu’on parle d’activité physique globalement et à partir d’une certaine quantité ou de certains engagements. Mais on peut avoir un niveau d’activité physique très élevé sans entrer dans la définition du sport qui introduit aussi un caractère compétitif.

4 Les allégations parfois trompeuses

Les allégations santé

Plus le volume d’entraînement et d’activité physique des sportifs est élevé, plus grandes seront leurs attentes à l’égard des compléments alimentaires, nourries par ce qu’on appelle des « allégations

d’un sportif actuellement utilisés par le groupe de travail de l’ANSES qui a eu beaucoup de mal à se dire : « À partir de quand peut-on imaginer que des besoins qui sont

santé» parfois trompeuses. Cette attente se crée quand on a tendance à chercher l'ergogénicité, c'est-à-dire l'augmentation de la performance par des méthodes autres que l'entraînement, la récupération et un environnement favorable.

Ces allégations santé sont ces messages qui affirment ou suggèrent qu'une denrée possède des propriétés nutritionnelles spécifiques (par exemple : tel produit assure la santé naturelle des os). Autre cas de figure : l'enrichissement des compléments alimentaires avec de la vitamine B12 permettrait de favoriser l'érythropoïèse¹⁰. Or, quand vous avez suffisamment de vitamine B12, si vous en prenez, vous en avez plus, mais vous n'aurez pas une meilleure érythropoïèse, donc pas plus de globules rouges¹¹ parce que vous apportez plus de ce qui permet d'assurer la fonction normale.

Il est important de comprendre que ces allégations sont pourtant réglementées au niveau européen et basées sur des justifications scientifiques. Mais l'évaluation se fait sur ce que le nutriment fait à la fonction. Quand on dit que la vitamine B12 favorise l'érythropoïèse, c'est vrai, cela fait partie du processus. Le règlement est évalué par l'Autorité européenne de sécurité des aliments, qui est l'homologue de l'ANSES au niveau

européen qui transmet ses avis à la Commission qui, elle, va entériner ou pas. La plupart du temps, elle valide ces avis. Cela autorise donc de fait les industriels à utiliser ces allégations.

Ainsi, un produit ou un complément alimentaire qui contient de la vitamine B12 va comporter l'allégation santé de façon tout à fait légale et promettre aux consommateurs : «avec plus de globules rouges, meilleur transport de l'oxygène, donc augmentation de la performance». Il y a aussi des allégations de type «augmente la performance». C'est le cas des produits contenant de la caféine.

La question se pose de savoir dans quelle mesure cette allégation, selon la situation dans laquelle on se trouve soi-même, est vraie ou pas. Parce qu'elle est vraie d'un point de vue scientifique, mais dans un autre contexte, elle peut ne pas l'être, et c'est en ce sens qu'elle peut être trompeuse.

La **Figure 10** présente l'évaluation d'une page d'allégations destinées aux sportifs. On voit que le nombre d'allégations favorables est limité.

Il est dit que les glucides aident à la performance. C'est vrai parce que quand on est en déficit énergétique et qu'on manque de glucides, la performance est effectivement très détériorée. Pour autant, si vous avez la quantité de glucides dont vous avez besoin, votre performance augmentera si vous consommez plus.

Au-delà des allégations trompeuses, quand on consomme des compléments alimentaires, il y a des risques

10. Processus de formation des globules rouges dans la moelle.

11. Type de cellule sanguine qui transporte l'oxygène vers tous les organes et tissus du corps et qui participe à l'élimination du dioxyde de carbone.

Guidance for health claims on muscle function and physical performance

Food constituent	Claimed effect	Outcome	Based on the essentiality of nutrients	Scope	References
Carbohydrate solutions	Maintenance of physical performance during endurance exercise	Unfavourable	--	Art. 13(5)	EFSa NDA Panel (2014c)
	Improvement of physical performance during a high-intensity and long-lasting physical exercise	Favourable	NO	Art. 13(5)	EFSa NDA Panel (2018)
Carbohydrate-electrolyte solutions	Reduction in rated perceived exertion/effort during exercise	Unfavourable	--	Art. 13(1)	EFSa NDA Panel (2011h)
	Enhancement of water absorption during exercise	Favourable	NO		
Casein protein hydrolysates	Maintenance of endurance performance	Favourable	NO		
	Growth or maintenance of muscle mass	Unfavourable	--		
Citrulline malate	Increase in endurance performance	Unfavourable	--		
	Faster recovery from muscle fatigue after exercise	Unfavourable	--		
Coenzyme Q10	Faster recovery from muscle fatigue after exercise	Unfavourable	--		
	Contribution to normal energy-yielding metabolism	Unfavourable	--		
Creatine	Increase in endurance capacity and/or endurance performance	Unfavourable	--		
	Increase in physical performance during short-term, high intensity, repeated exercise bouts	Favourable	NO	Art. 13(1)	EFSa NDA Panel (2011k)
	Increase in endurance capacity	Unfavourable	--		
	Increase in endurance performance	Unfavourable	--		
L-carnitine	Improvement in muscle strength (in combination with resistance training)	Favourable	NO	Art. 13(5)	EFSa NDA Panel (2016b)
	Faster recovery from muscle fatigue after exercise	Unfavourable	--	Art. 13(1)	EFSa NDA Panel (2011a)
L-carnosine	Skeletal muscle tissue repair	Unfavourable	--		
	Increase in endurance capacity	Unfavourable	--		
Glycaemic carbohydrates	Increase in muscle power	Unfavourable	--	Art. 13(1)	EFSa NDA Panel (2011b)
	Recovery of normal muscle function (contraction) after strenuous exercise	Favourable	YES	Art. 13(5)	EFSa NDA Panel (2013)
L-glutamine	Increase in endurance capacity	Unfavourable	--		
	Growth or maintenance of muscle mass	Unfavourable	--	Art. 13(1)	EFSa NDA Panel (2011c)
Magnesium	Faster restoration of muscle glycogen stores after strenuous exercise	Unfavourable	--		
	Skeletal muscle tissue repair	Unfavourable	--		
Magnesium	Maintenance of normal muscle function (contraction)	Favourable	YES	Art. 13(1)	EFSa NDA Panel (2009c)

SCIENTIFIC OPINION
 EFSA JOURNAL 2018;16(10):3434
 DOI: 10.1017/S1566752918000004

Guidance on the scientific requirements for health claims related to muscle function and physical performance (Revision 1)

www.efsa.europa.eu/efsajournal 20 EFSA Journal 2018;16(10):3434

Figure 10

Liste d'allégations d'amélioration de la performance sportive et musculaire.

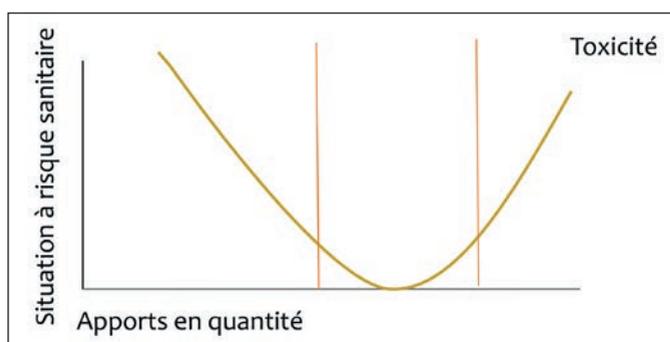


Figure 11

Variation du risque sanitaire en fonction de l'apport et zones de toxicité.

pour la santé car si une insuffisance est un problème, un apport en excès peut être également toxique (Figure 11).

La définition du risque (Organisation Mondiale de la Santé, 2004) est la probabilité d'un effet néfaste sur un organisme, un système ou une population, causé dans des circonstances déterminées par l'exposition à un agent.

En termes de risque, il y a la perception du risque, l'analyse du risque et le management du risque (Figure 12). L'ANSES fait l'analyse du risque, c'est-à-dire qu'elle regarde concrètement et objectivement si l'agent (cela peut être

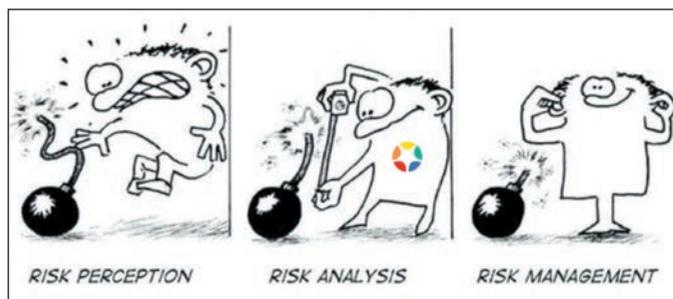


Figure 12
Perception, analyse et management du risque.

l'amiante¹²), la pollution de l'air ou un complément alimentaire (ou une substance présente dans un complément alimentaire) présente un risque ou pas. L'ANSES analyse ce risque et fournit des éléments scientifiques de façon à aider le décideur à prendre soit des décisions de police, soit des décisions réglementaires. Le management du risque est fait par le décideur.

compléments alimentaires et de certains aliments enrichis. Cela peut être dû à la substance, à un mésusage (c'est-à-dire la prise d'une trop forte dose), ou à une fraude.

Sur la **Figure 13**, on peut voir, fléchés en rose, les signalements des effets indésirables liés aux compléments alimentaires destinés aux sportifs avec des niveaux de gravité variables. L'ANSES a rendu un avis sur ce

5 Le dispositif de nutrivigilance : remontées d'effets indésirables

Par contre, depuis une dizaine d'années, l'ANSES a des remontées d'effets indésirables des compléments alimentaires et des denrées enrichies en micronutriments destinés aux sportifs. Il y a donc un dispositif de vigilance qui permet à tout à chacun de déclarer des effets indésirables qui pourraient être liés à la consommation de certains

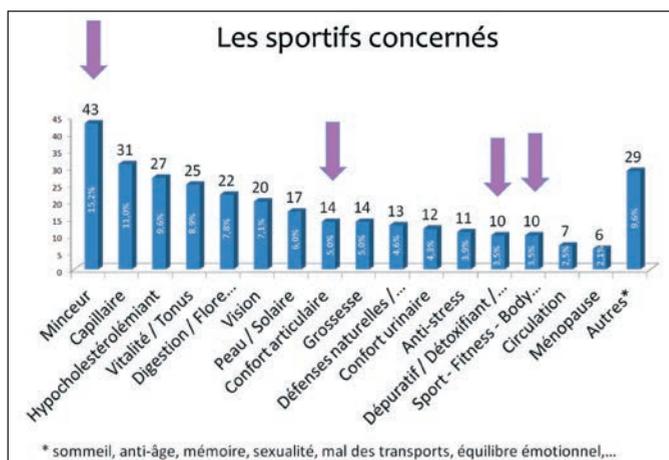


Figure 13
Nombre de signalements des effets indésirables liés aux compléments alimentaires. Ceux pris pour des visées sportives sont indiqués par des flèches roses.

12. Matériau massivement utilisé dans les bâtiments par le passé et désormais classé comme une substance cancérigène avérée pour l'homme.

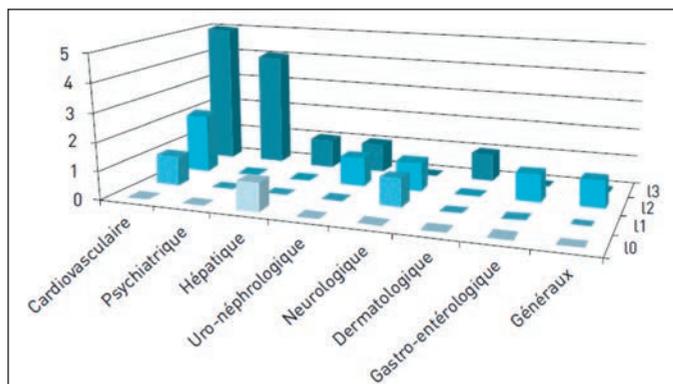


Figure 14

Types d'effets indésirables signalés dans le cas du dispositif de nutrivigilance, susceptibles d'être liés à la consommation de compléments alimentaires pour les sportifs, et niveau d'imputabilité retenu après expertise. Les imputabilités établies pour chaque cas se répartissent comme suit : imputabilité exclue (I0), imputabilité douteuse (I1), imputabilité possible (I2) et imputabilité vraisemblable (I3) (ANSES, 2016).

sujet il y a quelques années et a vu qu'il y a certains produits qui sont aussi adultérés¹³.

On entre dans une zone qui est peut-être celle du dopage à l'insu de l'utilisateur, notamment si on consomme un complément alimentaire qui n'étiquette pas une substance dopante. La substance dopante a des effets sur la santé, et ce sont ces effets qui nous sont parfois déclarés. Le déclarant pense que c'est le complément alimentaire qui est responsable alors qu'en fait c'est la substance présente dans le complément alimentaire qui a provoqué ces effets qui sont parfois graves, notamment les effets cardiovasculaires puisque l'effet est assez immédiat. Il y a aussi beaucoup d'hépatotoxicité¹⁴.

13. Altérés d'une manière contraire aux dispositions légales ou réglementaires.

14. Capacité d'une substance (comme les médicaments) à provoquer des dommages au foie.

Les sportifs sont concernés aussi par des compléments alimentaires qui ne leur sont pas spécifiquement destinés. Cela peut être un complément alimentaire qu'il va consommer pour la santé des articulations et qui peut conduire soit à un contrôle antidopage anormal soit avec un effet sur la santé s'il n'est pas soumis à un contrôle.

Les effets indésirables aigus chez le sportif sont ceux évoqués sur les **Figures 15** et **16**. On mesure un niveau de gravité au niveau de l'imputabilité¹⁵. Le niveau de gravité augmente dans le cas où il entre dans une catégorie identifiée comme étant grave. On peut aller d'un effet qui peut être mal de tête – c'est une imputabilité faible –, jusqu'au décès ou à un pronostic vital engagé – c'est alors un niveau très élevé. La **Figure 14** rapporte des effets indésirables observés avant 2016 qui avaient entraîné ces travaux d'analyse de risque et d'évaluation de risque. Depuis 2017, nous avons reçu 154 nouveaux cas, dont seulement 90 cas analysables, parce qu'il faut que le cas soit bien renseigné pour pouvoir être analysé.

Mais il faut comprendre que les nombres de cas sont inférieurs à la réalité : en général, la plupart des cas ne sont pas déclarés soit parce que c'est compliqué, soit parce que le médecin ne fait pas l'effort de déclarer.

Pour l'ANSES, c'est très important d'avoir ces remontées de cas, car il suffit d'avoir

15. Possibilité d'attribuer à un individu la responsabilité d'une infraction.

quelques cas pour tirer un fil qui permettrait d'identifier qu'il y a un problème avec une substance. Cela peut être des contaminations, des adultérations... Le problème est évidemment la nocivité du produit. Au-delà, chez le sportif engagé en compétition, cela peut conduire à un contrôle antidopage anormal.

Dans la composition des compléments alimentaires pour sportifs (Figures 15 et 16), on trouve, d'une part, des substances qui ne sont pas interdites et qui peuvent être présentes dans les nutriments (c'est la définition des compléments alimentaires d'un point de vue réglementaire) et, d'autre part, des substances interdites qui sont soit des substances totalement interdites pour un consommateur ou un patient, soit des substances qui sont autorisées dans le médicament et qui, de fait, ne sont pas autorisées en complément alimentaire et qui sont détournées de leur cible thérapeutique.

Quelques cas sans adultération (Figure 17) ont été rapportés. Ainsi, une consommation excessive de thé vert a des effets sur le foie. Si l'objectif initial est la perte de poids, il n'empêche que cet effet entraîne des atteintes hépatiques indésirables notoires. Beaucoup de cas d'effets indésirables ont été signalés avec les boissons dites « énergisantes » dont on a beaucoup parlé il y a une dizaine d'années, mais d'autres sont encore mis au jour.

Nous avons aussi observé des effets indésirables avec des produits qui contiennent des extraits de *Citrus aurantium*, qui

Substances visant l'augmentation de la masse musculaire		
Substances non interdites		Substances interdites
acides aminés	protéines*	stéroïdes anabolisants androgènes clenbutérol
	acides aminés à chaîne ramifiée	
	glutamine	
	β-hydroxy-β-méthylbutyrate (HMB) et α-cétoisocaproate	
	L-tyrosine	
	β-alanine	
extraits de plantes	arginine	
	créatine*	
	<i>Tribulus terrestris</i>	
minéraux	plantes du genre <i>Smilax</i>	
	vanadium	
	chrome (picolinate)	

Figure 15

Composition des compléments alimentaires pour sportifs (1/2).

Substances visant la diminution de la masse grasse		
Substances non interdites		Substances interdites
extraits de plantes	L-carnitine	clenbutérol éphédrine et analogues (pseudoéphédrine et phénylpropanolamine) sibutramine 1,3-diméthylamylamine (DMAA) 2,4-dinitrophénol (2,4-DNP)
	choline	
	2-phényléthylamine (PEA)	
	<i>Cissus quadrangularis</i>	
Substances d'origine végétale	<i>Coleus forskohlii</i>	
	<i>Garcinia cambogia</i>	
	<i>Magnolia officinalis</i>	
	évodiamine	
	caféine	
	théobromine	
	p-synéphrine	
	cétone de framboise	

Figure 16

Composition des compléments alimentaires pour sportifs (2/2).

contient de la p-synéphrine¹⁶, qui est adrénérergique. Ce stimulant adrénérergique combiné par exemple à la caféine a provoqué certains décès.

Dans le cas des extraits de thé vert et de citrus, nos analyses ont permis de caractériser le danger et d'établir une relation de cause à effet entre le complément alimentaire qui a été consommé et

16. Substance extraite de l'orange amère aux effets similaires à la caféine.

17 cas d'atteintes hépatiques avec des extraits de thé vert → Avis de l'Anses du 13 décembre	
Plus de 200 cas d'effets indésirables avec des boissons dites « énergisantes » → Avis de l'Anses du 6 septembre 2013	
18 cas d'effets indésirables avec des produits contenant des extraits de Citrus contenant de la p-synéphrine → Avis de l'Anses du 14 mars 2014	

Figure 17

Exemples de cas sans adultération.

l'effet indésirable qui a été déclaré. Nous avons pu ainsi ajouter une colonne de restrictions (Figure 18) qui se révèle une aide à la décision pour la Direction générale de

la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes. La Direction générale de l'alimentation a récupéré ces missions récemment.

Ces restrictions vont donc permettre de limiter le risque auquel peut être exposé le consommateur (Figure 19).

6 Une norme protectrice

Une norme protectrice a été bâtie à l'initiative de la France. Aujourd'hui, c'est devenu une norme européenne visant à harmoniser les pratiques.

On est donc passé d'une norme française (Figure 20), publiée en 2012, à une norme

PLANTES DONT L'EMPLOI EST AUTORISÉ DANS LES COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES					
NOM scientifique	FAMILLE	NOM vernaculaire	PARTIES utilisées	SUBSTANCES à surveiller	RESTRICTIONS
<i>Citrus aurantium L.</i>	Rutaceae	Oranger amer, Bigaradier, Oranger de Curaçao 	feuille, fleur, fruit, péricarpe (écorce ou zeste)	furocoumarines, p-synéphrine, octopamine	La quantité ingérée de p-synéphrine doit être inférieure à 20 mg par dose journalière recommandée. L'étiquetage doit comporter un avertissement déconseillant l'emploi aux enfants, aux femmes enceintes ou allaitantes et en cas de traitement anti-hypertenseur. La caféine et les sources de caféine ne sont pas autorisées dans les compléments alimentaires contenant <i>Citrus aurantium L.</i>
<i>Camellia sinensis (L.) Kuntze</i>	Theaceae	Théier 	feuille	dérivés de xanthine (caféine, théophylline), catéchines (dont epigallocatechine gallate (EGCG)), théanine	Seules sont admises la poudre issue du broyage des feuilles et les préparations obtenues à partir des solvants suivants : l'eau, l'alcool à 25 % (v/v), ainsi que les solvants autorisés pour la décaféination ou la suppression des matières irritantes et amères. Les recommandations d'emploi ne doivent pas conduire à une ingestion quotidienne d'EGCG supérieure à 300 mg. L'étiquetage doit comporter des avertissements déconseillant leur prise en dehors des repas, ainsi que leur consommation par les enfants, les adolescents, les femmes enceintes ou allaitantes.

Figure 18

Exemples de plantes dont l'emploi est autorisé dans les compléments alimentaires.

européenne, qui vient d'être publiée. Elle vient compléter la réglementation. Si elle n'a pas de caractère obligatoire, mais permet de limiter les risques qui sont liés à l'adulteration avec un certain nombre de contraintes qui constituent un cahier des charges (comme pour toutes les normes) et qui permet d'identifier les industriels qui auraient fait l'effort de répondre à ce cahier des charges.

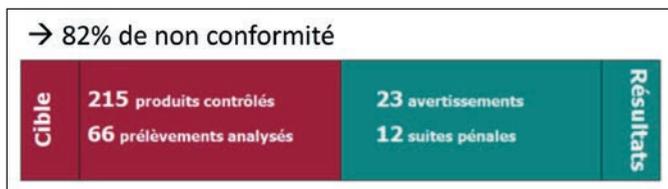


Figure 19

Résultats des enquêtes de la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) sur les compléments alimentaires contenant des extraits de thé vert et/ou d'orange amère et mesures prises.

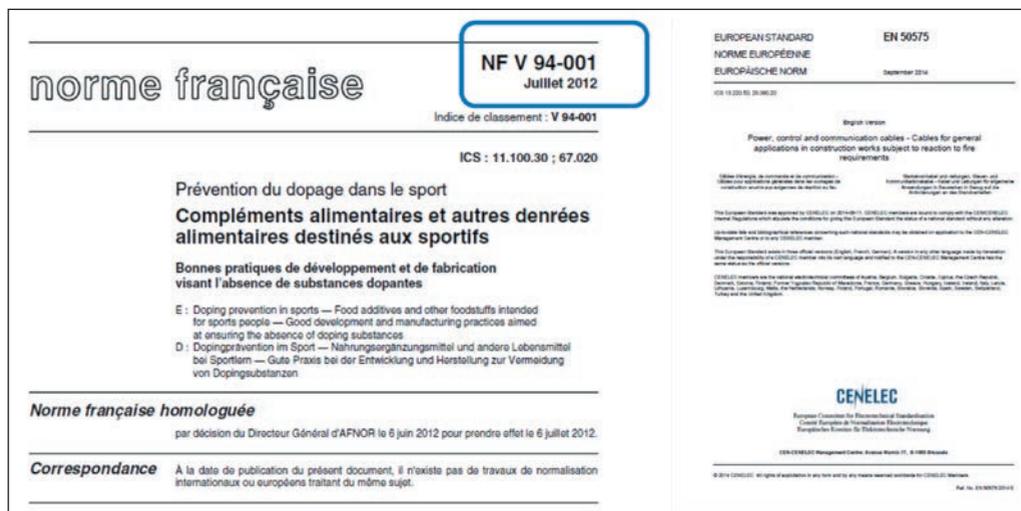


Figure 20

Aperçu des normes française (à gauche) et européenne (à droite) concernant les compléments alimentaires et autres denrées alimentaires destinés aux sportifs.

Conclusion

La supplémentation en tant que telle n'améliore pas la performance. Elle évite une diminution de la performance si l'alimentation n'est pas satisfaisante. Elle n'est donc pas nécessaire pour les athlètes dont le régime est équilibré. Le premier prérequis est une alimentation diversifiée et équilibrée.

Elle est inefficace s'il s'agit d'aides ergogéniques car elle peut présenter des risques. Elle peut faire l'objet d'allégations trompeuses pour une personne non concernée, soit parce que l'allégation n'a pas été évaluée correctement.

Et surtout, elle n'est pas sans risque pour la santé. Or en nutrition, on n'est pas dans le domaine du médicament, on considère que le risque doit être nul. Dans le cas du médicament, c'est différent puisqu'on est dans une situation pathologique dans laquelle on peut accepter un certain niveau de risque. Dans tous les cas, le rapport bénéfice-risque doit être positif. En nutrition, on ne doit pas prendre de risques pour s'alimenter.

Les besoins nutritionnels sportifs augmentent, certes, mais ils peuvent être couverts par l'alimentation courante, malgré tous les débats.

Partie 4

Sport et industrie :
des valeurs communes

Des valeurs communes autour de la recherche, de l'industrie et du sport : l'exemple de Sanofi

Danièle Olivier et Paul Rigny

D'après les conférences d'Audrey Duval (Présidente de Sanofi France) et de Rafik Amrane (Directeur Industriel de Sanofi Santé Grand Public)

1 Sport, industrie et recherche : quels liens ?

D'année en année, on voit la place du sport augmenter dans nos sociétés du XXI^e siècle. C'est la rubrique fondatrice de nombreux médias, qu'il s'agisse de grandes radios comme France Inter ou Radio Luxembourg, ou des journaux, nationaux et régionaux. Les « champions » sont devenus les vraies vedettes, on parle de leurs états d'âme, de leurs querelles, de leurs salaires ; tout ce qui les concerne polarise les conversations. Ils ont rejoint sous ce rapport les politiques ou les artistes de

masse. Il faut lire des sociologues pour voir si on peut comparer leur place à celle que la religion a souvent perdue, tout au moins en Occident. Tout cela est bien dans l'esprit du temps.

Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser sur les rapports qui existent entre le sport, l'industrie et la recherche.

Commençons par souligner que le sport est toujours moteur pour inspirer ou mobiliser l'apparition d'équipements, d'abord spécialisés puis grand public. Il est loin le temps où des marathoniens éthiopiens stupéfiaient le monde en courant pieds nus : on a maintenant

des chaussures, et il en faut toujours des meilleures. Ainsi, pour n'importe quel sport pratiqué de nos jours, le matériel est omniprésent. Qui dit **matériel** dit fabrication. Qui dit fabrication dit **industrie**... et pas seulement industrie des chaussures! Tel est le **premier lien entre l'industrie et le sport**.

Mais le matériel peut être amélioré, se spécialiser, s'inventer... Il faut faire des essais, échouer, mais recommencer... Bref, le matériel sportif mobilise la recherche dans les laboratoires industriels, puis académiques. La recherche ne concerne pas seulement l'aspect matériel. L'aspect sociologique n'est pas moins important. Il fait d'ailleurs l'objet d'articles, d'émissions et de reportages. Il s'agit de saisir les composantes humaines du sport, au niveau individuel en premier lieu, et pour l'améliorer, de comprendre les comportements du corps lors des épreuves et de l'entraînement, sur le plan physique comme sur le plan psychique. Tout cela mobilise une part importante des compétences des laboratoires, travaux qui bénéficient aux performances des sportifs et des parasportifs. C'est le **deuxième lien entre la recherche scientifique et le sport**.

2 Sanofi, une grande entreprise de chimie et pharmacie

Ce chapitre veut illustrer l'autre parallèle, souvent insoupçonné, qu'il peut y avoir entre un sportif et un industriel, entre un coureur et un chercheur : celui des **valeurs**

communes. Comme exemple, nous avons choisi Sanofi.

Sanofi est une entreprise pharmaceutique française au rayonnement mondial. Sa mission est d'améliorer la santé des gens au travers de médicaments et de vaccins.

Son implantation est très importante en France : ses usines françaises réalisent environ 30 % de la production du groupe dans le monde. Elle est le premier investisseur privé en recherche et développement en France. Sanofi a fait le choix de la France à une époque où l'on parle beaucoup de souveraineté.

Quelques mots, puisque c'est à la Maison de la Chimie que le colloque sur la chimie s'est tenu. On entend beaucoup parler depuis une vingtaine d'années des biotechnologies, qui permettent de produire des principes actifs à partir du vivant et qui ont connu un développement fantastique. Pourtant, on ne le sait pas toujours, mais une molécule sur deux en recherche dans le monde actuellement est issue de la chimie. La chimie a donc un rôle stratégique : elle est, et elle restera, incontournable pour la santé de demain.

Sanofi possède plusieurs sites de production de chimie pharmaceutique dans le monde. Les deux plus grands se trouvent en France : l'un à **Aramon** dans le Gard (**Figure 1**), le second à **Sisteron** dans les Alpes-de-Haute-Provence (**Figure 2**). Sur ces sites, les équipes de Sanofi produisent des principes actifs de médicaments dits « matures » et préparent l'arrivée des principes actifs de demain.



Figure 1

Site chimique de Sanofi Aramon.



Figure 2

Site chimique de Sanofi Sisteron.

3 Des valeurs communes au sport et à la science

En ce qui concerne les liens entre les valeurs d'une entreprise comme Sanofi et celles véhiculées par le sport, il y en a beaucoup en réalité, notamment pour l'industrie

pharmaceutique, qui est avant tout basée sur la recherche.

La recherche, c'est répéter, répéter, répéter. La recherche, c'est aussi échouer, souvent, pour y arriver, parfois. Le sport, c'est exactement la même chose : quand on pratique un sport de haut niveau,

on essaie, on s'entraîne beaucoup, on répète. L'aviron, par exemple, est basé sur un geste que l'on va répéter des millions de fois par an en essayant de viser la perfection, qu'on ne trouve jamais réellement. De même, dans une usine, quand on produit quelque chose, on répète, toujours et encore, en suivant une recette longuement mise au point, et que l'on essaiera toujours d'améliorer pour produire plus rapidement, de façon plus économique ou moins énergivore.

Autre élément à souligner : la compétition existe dans le sport, mais aussi dans l'industrie et la recherche. Le premier qui trouve une nouvelle molécule a un avantage, tout comme ceux qui sont les meilleurs à produire.

Il y a donc beaucoup d'autres parallèles entre sport, recherche, industrie que ceux liés au matériel.

Le témoignage de Rafik Amrane (*Figure 3*) est à ce titre très intéressant. Il est actuellement le directeur industriel de l'une des quatre divisions de Sanofi : « Santé grand public ». Il s'agit de tous les médicaments que l'on peut acheter sans ordonnance chez le pharmacien et

dans les supermarchés. Cette division fournit à peu près deux milliards de boîtes de médicaments chaque année. Rafik Amrane a une formation d'ingénieur en mécanique. Également sportif de haut niveau, il a notamment participé aux Jeux Olympiques de Sydney en 2000 dans l'épreuve d'aviron, et continue à récolter les titres de champion de France plus de vingt ans après cette participation.

Voici cinq exemples de **valeurs communes** que Rafik Amrane établit entre le sport et la science (*Figure 4*) :

Tout d'abord, le sport apprend l'**humilité**, une qualité importante que l'on ne trouve pas toujours dans le monde du travail. Pourquoi l'humilité ? Parce qu'il y a beaucoup d'échecs dans le sport, et c'est dur : il faut recommencer, parfois on se trompe, on se donne des objectifs que l'on n'atteint pas. Mais cela apprend à toujours se remettre en question. Cette remise en question est aussi très importante dans le monde de la science et de l'industrie : si on ne se demande pas si l'on va dans la bonne direction, si l'on fait les bons choix, si l'on est dans la bonne dynamique, on peut se tromper.



Figure 3

Rafik Amrane, une double compétence : Directeur Industriel de Sanofi et sportif de haut niveau.

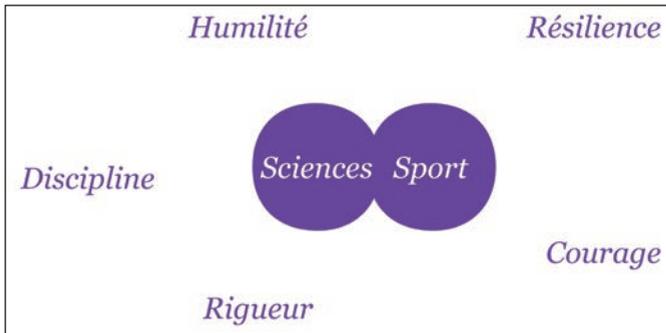


Figure 4

Valeurs communes entre la science et le sport.

Deuxième valeur commune : la **résilience**. Être un athlète de haut niveau, cela demande de s'entraîner quotidiennement. Il faut y retourner tous les jours, même si c'est dur, que ça fait mal, que c'est fatigant. Dans le monde de l'industrie, c'est la même chose : pour fournir les médicaments dans le monde, les usines tournent 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. On ne peut pas s'arrêter et se dire « on verra dans un mois, dans une semaine ». C'est pourquoi cette résilience est très importante.

Ensuite, il faut aussi avoir du **courage**. Pour pratiquer un sport de haut niveau, il faut être courageux : il faut prendre des décisions, faire des choses que l'on n'aurait pas faites dans certains cas, et avoir le courage d'aller au bout de soi-même. Reprenons l'exemple de l'aviron, qui est l'un des sports qui mobilisent le plus de muscles. Quand vous faites une course d'aviron (environ 7 minutes), votre corps entier va produire de l'acide lactique et être en souffrance : votre cerveau vous dit de vous arrêter. Parfois, pour pouvoir gagner, il faut que le corps dise au cerveau qu'il ne doit pas s'arrêter, et au

contraire qu'il doit accélérer : c'est le seul moyen d'atteindre ses objectifs. Ce courage-là, il est aussi essentiel dans le monde de l'entreprise pour prendre des décisions compliquées, par exemple.

Enfin, il faut de la **rigueur** et de la **discipline** : il n'y a pas de performances à long terme sans rigueur ni discipline. Un athlète olympique ne se dit pas six mois avant les Jeux : « Tiens, je ne suis pas mauvais, j'aimerais faire les Jeux Olympiques ». Un engagement olympique, c'est quatre voire huit ans de préparation. L'athlète va d'abord s'engager sur un premier cycle olympique pour participer aux Jeux et acquérir de l'expérience. Certains gagnent certes dès leur première participation, mais c'est très rare statistiquement. Ensuite, il faut se réengager sur quatre ans pour aller chercher un résultat. Cet engagement est quotidien : il faut faire des sacrifices. Cette discipline et cette rigueur sont aussi essentielles dans la science et l'industrie si on veut pouvoir mettre au point des traitements innovants qui sauvent des patients.

4 L'action de Sanofi pendant et après les Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024

Sanofi n'est pas une entreprise que l'on attendrait pour soutenir des Jeux Olympiques. Alors pourquoi est-elle venue sur cet événement ?

En s'associant au plus grand événement sportif au monde quand il se passe en France, l'enjeu est d'affirmer le caractère français de Sanofi. Mais pas seulement. Sanofi souhaite remettre la **science au premier plan** avec une stratégie de médicaments à haute valeur ajoutée. Il y a une similitude avec le sport de haut niveau.

La volonté de Sanofi est de créer un dialogue au sein de l'entreprise, mais aussi de le porter en dehors de l'entreprise. Par exemple, un certain nombre de para-athlètes ont malheureusement subi des séquelles très lourdes à la suite d'une méningite. Sanofi

s'est associée à certains de ces athlètes pour faire une grande campagne de sensibilisation sur cette maladie et sur sa vaccination, et a même lancé le « drapeau des méningites » (**Figure 5**) pour renforcer le message partout dans le monde. Cette initiative a reçu le label Impact 2024 de la part de Paris 2024 et de ses partenaires, récompensant les efforts déployés pour promouvoir la santé, l'inclusion, la solidarité et l'égalité par le biais du sport.

Un autre exemple est le programme des **volontaires des Jeux Olympiques**. Un événement comme les Jeux mobilise beaucoup de bénévoles. Sanofi a fait appel à ses collaborateurs pour envoyer la plus grande délégation de volontaires d'entreprises pendant les Jeux. Venant du monde entier, ils vont aider à l'organisation des Jeux Olympiques et Paralympiques.

Un dernier exemple est la création d'un partenariat avec l'Unesco en soutenant le programme « Feed for Life¹ » qui utilise le sport comme vecteur d'inclusion, notamment auprès de publics isolés, des jeunes filles, des réfugiés, des communautés vulnérables. Ce programme va mobiliser environ 10 000 employés chez Sanofi sur les cinq années qui viennent, en laissant un héritage des Jeux de Paris 2024.

Ces trois exemples montrent comment on peut **utiliser le sport pour porter de grandes causes** comme la diversité et l'inclusion.



Figure 5

Le drapeau des méningites, fruit d'une collaboration entre Sanofi et des para-athlètes touchés par la maladie.

1. « Nourrir pour la vie ».

Conclusion

Le monde sportif et le monde professionnel partagent des valeurs essentielles telles que l'humilité, la résilience, le courage, la rigueur et la discipline. Ces qualités, forgées par la pratique du sport de haut niveau, sont également indispensables pour réussir dans le milieu professionnel. Le parallèle entre ces deux univers montre que les compétences et attitudes développées dans le sport sont directement applicables au monde du travail, renforçant ainsi l'idée que l'engagement, la persévérance et la quête d'excellence sont des **moteurs communs pour atteindre des objectifs ambitieux.**

Les matériaux au service de la performance de la chaussure

Directeur industriel des matières premières chez Decathlon, Alexis Lahutte est diplômé de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Lille (ENSCL), ingénieur dans le domaine des matériaux, spécialisé dans les matériaux élastomères.

Introduction

Decathlon est une entreprise française et familiale créée il y a 48 ans dans le nord de la France par Michel Leclercq (*avec le t-shirt bleu, Figure 1*) et 5 autres collaborateurs qui ont eu la volonté de rassembler tous les sports dans les magasins Decathlon.

Le premier produit conçu par la marque est le cadre de vélo (*Figure 1*), conçu dix ans après la création de l'enseigne. Il est le début d'une longue liste de produits conçus par Decathlon qui est aujourd'hui connu comme une entreprise vendant et concevant également des produits sportifs.

Aujourd'hui, Decathlon compte plus de 100 000 employés et

figure comme la première entreprise française au classement Forbes 2023¹ des meilleurs employeurs (*Figure 2*). L'enseigne comptait un seul magasin dans le nord de la France ; elle en possède aujourd'hui 1751, répartis dans plus de 60 pays, ce qui en fait une entreprise distributrice de produits sportifs présente partout dans le monde et s'adressant à un nombre d'utilisateurs croissant.

Mais Decathlon est aussi **un concepteur et un producteur de produits pour le sport** qui travaille avec 1400 fournisseurs

1. Magazine économique américain qui présente souvent des classements (meilleures fortunes, meilleurs employeurs...).



Figure 1

En haut à gauche, les 6 pionniers à l'origine de Decathlon portant des t-shirts avec la devise de l'enseigne. En bas à gauche, le magasin Decathlon d'Englos (près de Lille) qui a ouvert en juillet 1976 et qui regroupe tous les sports en un seul et même endroit. Au centre, le premier produit conçu par la marque Decathlon : un cadre de vélo.



Figure 2

Différents chiffres clés de Decathlon avec, de gauche à droite : le nombre de collaborateurs, le nombre de magasins, le chiffre d'affaires, le nombre de fournisseurs à travers le monde et le nombre d'utilisateurs souhaité d'ici à 2026.

dans 47 pays répartis partout sur la planète.

Un milliard d'utilisateurs (Figure 2) n'est pas le chiffre de 2024 mais la cible prévue pour 2026. Ce nombre est certes impressionnant, mais il manque quand même 7 milliards de personnes, qui n'ont pas encore accès au sport pour de nombreuses raisons, et la mission

que se fixe Decathlon est de rendre le sport accessible à tous en raison de tous les bienfaits qui lui sont associés.

Decathlon est une entreprise qui veut être au proche de ses utilisateurs, pour comprendre au mieux leurs besoins et leur permettre de pratiquer leurs loisirs.

En France, la plupart des sites de conception de l'enseigne sont présents dans le nord de la France, dans la métropole lilloise. Celui dédié aux sports de montagne (Figure 3, en haut à droite) se situe en Haute-Savoie, au pied du mont Blanc. Celui de Hendaye, dans le Pays basque (Figure 3, au milieu à droite), est dédié aux sports aquatiques. Decathlon a donc des sites de conception de petite taille mais très spécifiques, ce qui permet de comprendre au mieux les attentes des utilisateurs dans les conditions réelles de la pratique des différents sports.

La mission qui anime aujourd'hui tous les employés et collaborateurs de Decathlon est de rendre les plaisirs et les bienfaits du sport durablement accessibles au plus grand nombre, que ce soit les utilisateurs qui commencent la pratique d'un sport, les utilisateurs qui progressent dans leur activité ou encore les experts, et cela à travers différents types de produits.

Aujourd'hui, Decathlon s'intéresse particulièrement à l'usage, l'utilisation et la connaissance de la pratique des sportifs dans 80 sports environ. L'objectif est de comprendre toutes les attentes et les besoins qui sont parfois induits par la pratique pour mieux développer les produits



Figure 3

Les principaux lieux de conception des produits Decathlon en France.

qui permettront de répondre à ces besoins.

La partie vente (« **Retail** », Figure 4), la plus importante, est connue et visible par tous : elle représente 80 % des collaborateurs Decathlon. La partie un peu cachée est la logistique (« **Logistics** », Figure 4) pour réapprovisionner la partie vente. Il y a aussi la partie conception des produits et production (« **Material & component** » et « **Finished goods factory** », Figure 4), moins connue mais répartie un peu partout sur la planète, dont la branche matières et composants permet de mieux répondre aux attentes des utilisateurs d'un point de vue performance et aussi de concevoir des composants qui vont être le moins impactant possible sur notre environnement.

Les engagements forts de Decathlon en matière de



Figure 4

« Notre mission : le sport pour tous, pour rendre les plaisirs et les bienfaits du sport accessibles à tous ».

développement durable sont portés par l'ensemble de ses collaborateurs : 46 % des ventes de 2023 sont des objets écoconçus (Figure 5) avec un minimum d'une démarche d'écoconception pour chacun de ces produits. L'objectif,

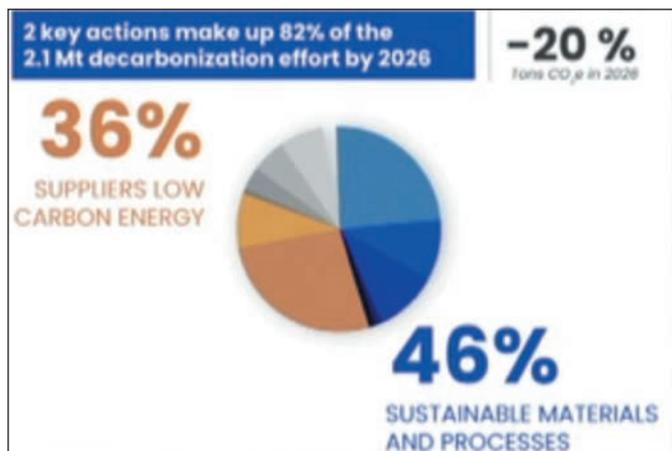


Figure 5

« 2 actions clés pour économiser 82 % des 2,1 Mt de carbone d'ici 2026 ».

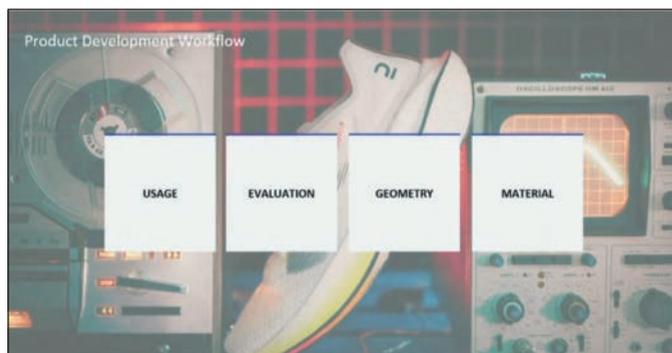


Figure 6

Les différentes étapes du processus de conception de Decathlon.

d'ici 2026, est de réduire l'impact environnemental global de Decathlon de 20 % (Figure 5).

Pour atteindre ces objectifs, l'entreprise doit agir sur les matières premières et leurs processus de transformation qui représentent 46 % de son impact environnemental (Figure 5). 36 % concernent l'énergie consommée par les magasins et les fournisseurs.

1 Le processus de conception et de développement d'un produit : la chaussure de sport

Le processus de conception doit faire le lien entre la science, notamment la physique et la chimie, le produit et les attentes des utilisateurs. On considérera donc l'usage, l'évaluation du produit, sa géométrie et les matériaux pour le réaliser (Figure 6). Tous ces points ne sont pas traités les uns à la suite des autres. C'est un processus itératif². Parfois, des boucles sont faites. Comme dans le monde du sport, on essaye, on rate, et parfois on réussit.

Decathlon a une équipe de 50 experts dédiée à la recherche sur le corps humain. Les recherches sont orientées autour de l'évaluation des attentes des utilisateurs dans leur pratique au quotidien pour comprendre leurs besoins qui n'ont pas nécessairement traits au produit mais plutôt au corps humain (Figure 7).

Comme l'enseigne vend des produits dans 65 pays dans le monde, la morphologie et les attentes des utilisateurs peuvent être complètement différentes. L'objectif est de comprendre les spécificités pour créer des produits qui répondent, d'une part, aux besoins du plus grand nombre et, d'autre part, à des besoins spécifiques locaux. La recherche est aussi dédiée à la compréhension des phénomènes thermiques non seulement pour les produits pour les sports d'hiver, mais aussi

2. Qui peut être répété.

pour la course à pied ou les produits du quotidien.

Les tests sur le terrain permettent de mesurer les attentes des utilisateurs, et d'évaluer et de classer les différents produits.

C'est en écoutant et en interrogeant les sportifs que tout commence. Comme on peut le voir en bas de la **Figure 8**, marcher sur une patinoire n'est pas intuitif. Bien évidemment, ces **utilisateurs-testeurs** sont protégés avec un casque et des renforts. Les marques des produits testés sont camouflées, ce qui permet d'éviter tous les biais lors de l'évaluation à cause d'une marque, d'un design lié parfois à une géométrie qui donne confiance, mais qui n'assure pas la performance du produit. Ces phases d'évaluations sur le terrain sont accompagnées par des ingénieurs essais terrain. L'un des objectifs est de pouvoir reproduire ces tests en laboratoire, ce qui permet par exemple de tester l'adhérence d'une chaussure dès la phase de conception. Ces tests en laboratoire permettent aussi d'éviter de passer par le terrain pour des tests longs comme ceux concernant les problèmes de durabilité. En effet, courir 1000 km ne se fait pas en deux jours.

1.1. La conception des produits

Après l'étape d'évaluation, des ateliers de conception sont organisés : Decathlon conçoit divers produits pour un large panel d'applications.

Pour fabriquer des produits qui répondent aux tendances

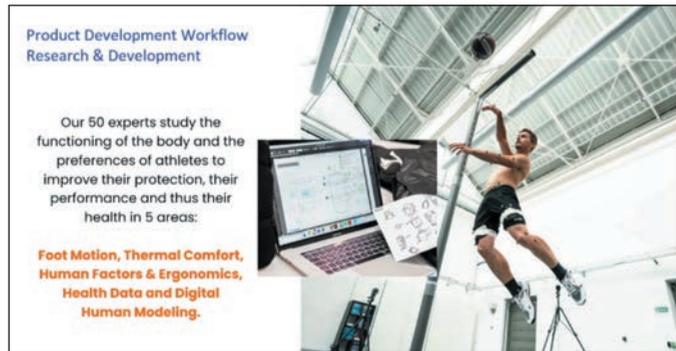


Figure 7

Recherche et développement : une cinquantaine d'experts étudie le fonctionnement du corps, les préférences des athlètes pour améliorer leur protection, leur performances et donc leur santé dans 5 domaines : les mouvements du pied, le confort thermique, les facteurs humains et l'ergonomie, les données de santé et la modélisation humaine digitale.



Figure 8

Évaluation des produits en développement : tests sur le terrain.

du marché et aux attentes des utilisateurs mais aussi à leurs besoins, qui ne sont pas forcément exprimés mais qui ont été découverts et évalués par les tests sur le terrain, **l'entreprise passe par une phase de design.**

C'est aussi un processus itératif impliquant une longue phase de prototypage : un grand nombre de produits

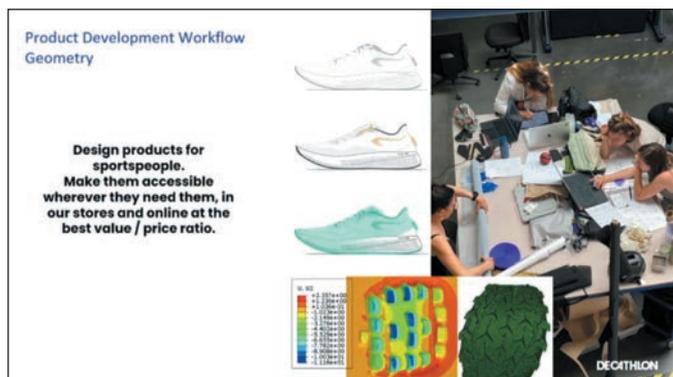


Figure 9

Le développement de la géométrie des produits : « le design des produits pour les sportifs ».



Figure 10

Le développement des matériaux pour les produits : la KD900X, réalisée en collaboration avec Arkema.

sont conçus, mais il y a beaucoup de ratés pour trouver le produit qui convient à l'usage. Les simulations numériques sont également largement utilisées pour évaluer l'impact des différents designs sur les performances. On peut le voir en bas de la **Figure 9** avec l'exemple de crampons et une simulation de leur insertion dans la boue pour avoir la meilleure performance de traction à l'usage.

1.2. Le développement du matériau pour le produit

Pour développer un produit, on commence parfois par la matière, parfois par la géométrie. Cela dépend des usages et de nombreux autres facteurs. Concernant la matière, l'un des objectifs est d'en maîtriser la recette et les ingrédients. Decathlon a les capacités de travailler les matériaux que ce soit en interne ou avec des partenariats.

Comme exemple, on peut citer celui de la chaussure KD900X (**Figure 10**), qui a été développée en partenariat avec Arkema. Si le processus de développement d'un produit est très long (dix-huit mois en moyenne pour une chaussure), celui d'une matière peut l'être également. Il a fallu plusieurs années pour développer avec Arkema une mousse haut de gamme pour la semelle de la chaussure de course à pied : ce processus a permis non seulement d'obtenir un taux de rebond que Decathlon n'arrivait pas à égaler, mais aussi d'apporter une singularité sur le marché par rapport à la durabilité de cette mousse.

Ce dernier point remplit l'un des objectifs de Decathlon, à savoir l'écoconception et donc la durabilité de ses produits. Grâce aux techniques de recherche en laboratoire et aux modèles prédictifs, il est possible de prédire le vieillissement de la matière avec l'utilisation.

Des tests permettent de caractériser les produits en laboratoire et de vérifier si les modèles prédictifs par rapport à la chaussure et à la matière s'avèrent vrais (**Figure 11**) avec

des performances et un vieillissement durables tout au long de la durée de vie du produit. Une chaussure de running peut être utilisée pour parcourir entre 600 et 1500 km. Après sa conception et son design, cette nouvelle phase de test sur le terrain est confiée à une centaine d'utilisateurs.

1.3. Les tests par les athlètes

Decathlon teste aussi ses produits sur des athlètes, qui gagnent des compétitions. Contribuant au processus de développement des produits, ils sont aussi les premiers utilisateurs des produits, avant même qu'ils arrivent en magasin. Cela permet d'avoir un retour continu d'athlètes de haut niveau et de tout mettre en œuvre pour améliorer les produits.

Parmi les athlètes qui utilisent des produits Decathlon, on retrouve : Paul Chelimo³ en athlétisme avec sa nouvelle paire Decathlon, Blandine L'Hirondel⁴ (qui a fini sur le podium de l'Ultra Trail du Mont Blanc en 2023), Gaël Monfils⁵ au tennis, Yohann Kowal⁶ pour la course à pied. D'autres équipements sportifs que la chaussure sont testés : le vélo avec l'arrivée de Van Rysel⁷ et le ballon de foot en Ligue 1 Uber Eats et en Ligue 2 BKT qui est un ballon Decathlon depuis plusieurs années et celui des compétitions européennes depuis 2024 (Figure 12).

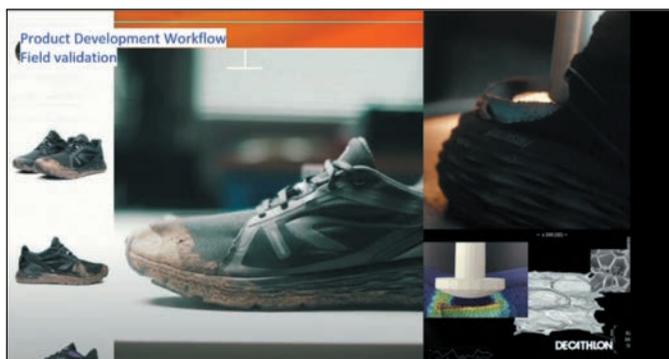


Figure 11

Au centre, une chaussure de course après sa phase de test de validation. En bas à droite, vérification avec des modèles prédictifs.

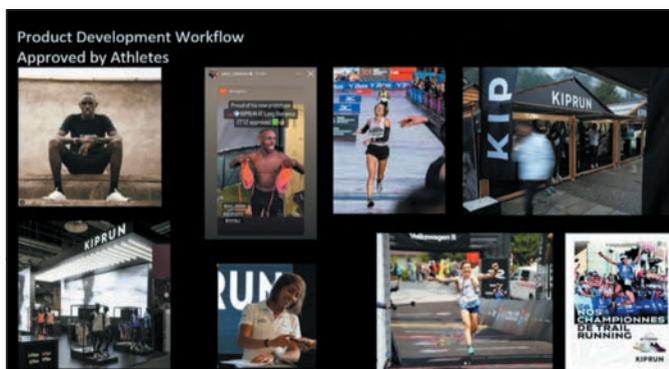


Figure 12

Athlètes utilisant les produits Decathlon.

3. Athlète olympique américain.

4. Traileuse française.

5. Tennisman français de renommée internationale.

6. Champion de demi-fond français.

7. Membre de l'équipe de cyclisme.

Conclusion

Finalement, pour Decathlon, le dernier juge des produits reste l'utilisateur. Un engagement fort de la marque est de répondre à l'ensemble des avis clients négatifs qui sont remontés dans les magasins ou *via* le site Internet. Ces avis clients sont directement reçus par les équipes conception qui vont les prendre en compte pour améliorer les produits. Decathlon s'engage à retravailler le processus de conception pour les produits ayant une note inférieure à 4,2/5, voire à retirer des magasins tous les produits ayant une note inférieure à 3/5. Ainsi, le modèle de chaussures KIPRUN KS900, sorti depuis plusieurs années, a de très nombreux avis de satisfaction, mais, comme tous les produits, il reste perfectible (*Figure 13*).



Figure 13

Le développement des produits est validé par les utilisateurs.

Chimie et sport olympique et paralympique

Relayé par tous les médias, magnifié par des images souvent époustouflantes, le sport captive et passionne. En 2024, la France a vécu au rythme des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris. Les grands événements sportifs sont non seulement de puissants vecteurs d'émotions collectives, mais aussi les révélateurs de travaux scientifiques permettant de pousser toujours plus loin les performances des athlètes.

Au-delà de la volonté et des capacités individuelles des sportifs, les records sont aujourd'hui bien souvent aussi le fruit de recherches scientifiques et industrielles.

Pour la préparation physique et mentale, médecins et chercheurs maîtrisent de mieux en mieux les paramètres, préparent des programmes alimentaires, adaptent les entraînements, enseignent la gestion des émotions.

Les équipements, accessoires, vêtements, chaussures bénéficient également des toutes dernières innovations technologiques. L'utilisation de nouveaux matériaux (par exemple les matériaux composites) permet également de changer la donne.

Sport, recherche scientifique et industrie partagent les mêmes valeurs : sens de l'effort et culture du résultat. Cet ouvrage, qui donne la parole aux experts scientifiques et industriels dans ce domaine, en est l'illustration concrète.



ISBN : 978-2-7598-3629-1

Prix : 25 €

edp sciences

www.edpsciences.org